SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©PHOTOMONTAGE SETA - MELITAS/SHUTTERSTOCK M ISOLATION PHOTO/SHUTTERSTOCK

+ Supplément 32 pages avec Challenges

Nucléaire
La solution des petites centrales
p. 91

Dépression
Les nouvelles pistes pour s'en sortir
p.48

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 924 - FÉVRIER - DÉPRESSION
FÉVRIER 2024 - N° 924 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $
L 13418 - 924 - F: 5,30 € - RD

PEUGEOT

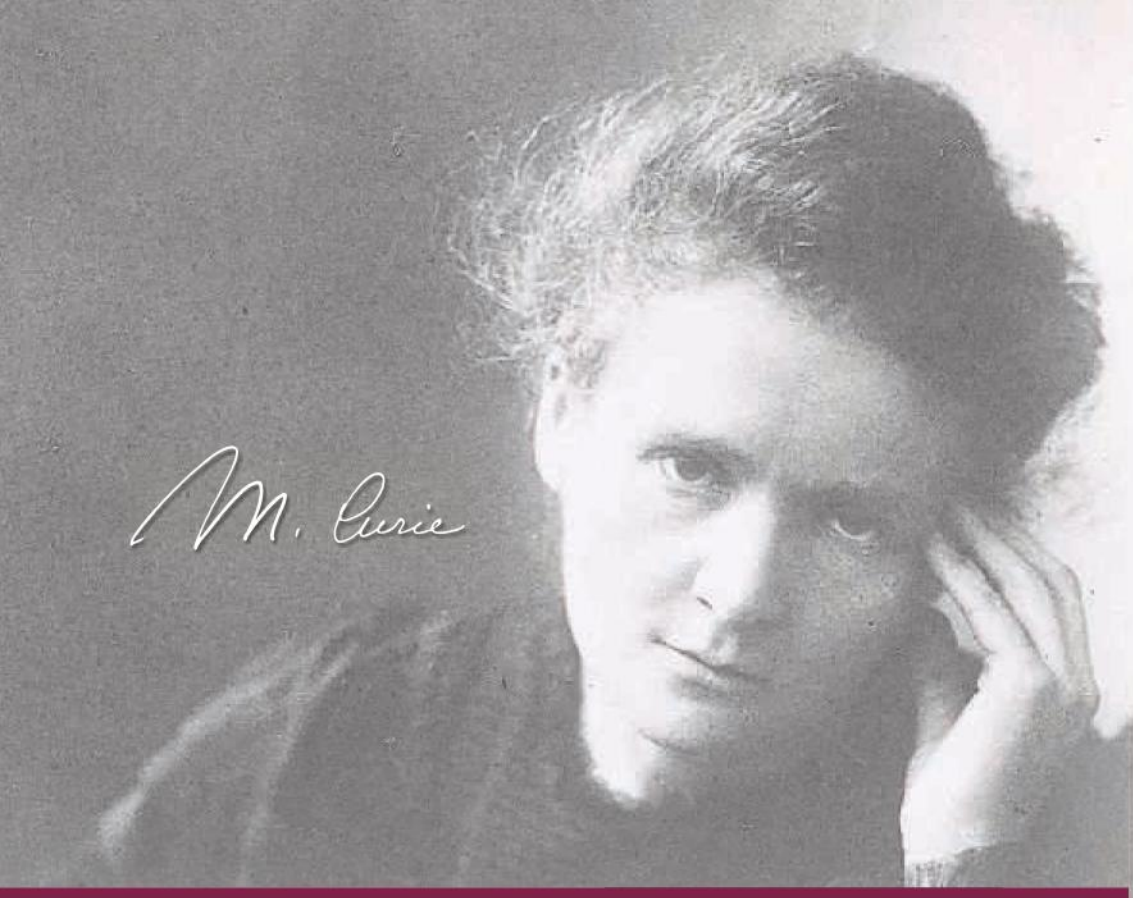
NOUVELLE E-208
100 % ÉLECTRIQUE

PEUGEOT i-Cockpit® 3D*
Jusqu'à 498 km d'autonomie**
Recharge de 80 % en 30 min***

PEUGEOT RECOMMANDE TotalEnergies **Consommation mixte WLTP (l/100 km) : 0.**

*De série ou indisponible selon les versions.**En cycle urbain. L'autonomie de la batterie peut varier en fonction des conditions réelles d'utilisation. ***Recharge sur une borne publique à courant continu de 100 kW. Automobiles PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles.

Au quotidien, prenez les transports en commun. #SeDéplacerMoinsPolluer



Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0224

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

2024, odyssée de l'espace

C'est vers le ciel que les Terriens sont invités cette année à tourner leurs regards, avec le lancement de fusées à répétition. Vers notre Lune et aussi vers cette lune glacée qui tourne autour de la planète géante Jupiter, la mystérieuse Europe. Celle-là même que visait une expédition imaginée en 1982 par Arthur C. Clarke dans *2010 : Odyssée deux*. Dans cette suite de son roman culte *2001 : L'Odyssée de l'espace*, une expédition cherchait à savoir ce qui était arrivé dans les parages de Jupiter et de sa lune au commandant Dave Bowman contre lequel, on s'en souvient, s'était mutiné l'ordinateur de bord Hal 9000. Vous avez dit intelligence artificielle ? Ses avancées ne vont pas cesser, elles aussi, d'être scrutées en priorité cette année.

Baie de la Viscosité. Attention, qui dit spatial dit risque maximum. À preuve, l'atterrisseur Peregrine ne visitera pas la « baie de la Viscosité » de notre Lune et finira brûlé dans notre atmosphère bien terrestre. À cause d'une fuite de carburant et malgré un lancement réussi depuis cap Canaveral le 7 janvier, la mission de cet engin construit par l'entreprise américaine Astrobotic est un échec. On attend de voir celles qui vont s'égrener, de la firme Intuitive Machines et de Firefly Aerospace, ou encore de la chinoise Chang'e et la japonaise Hakuto-R… *« L'espace, c'est dur »*, rappelle la Nasa, qui a décidé de repousser ses propres missions lunaires Artemis 2 et 3 en 2025 et 2026.

Europe, zone de tous les dangers. Les astronautes ne vont pas (re)fouler le sol sélène de sitôt. On regardera donc encore plus loin, avec le lancement vers Europe de la mission Clipper, prévu en octobre. De quoi frémir en 2030, si la sonde arrive comme prévu dans cette zone de tous les dangers, le champ magnétique de Jupiter ayant de quoi ravager l'électronique embarquée. La Nasa l'assure hyper-renforcée. À 5 milliards de dollars la mission, c'est bien le moins.

Mystères de la vie. Que ne ferait-on pas pour percer les mystères de la vie et de ses origines ! *Sciences et Avenir* y consacrait son dossier de couverture, il y a un an. Les astrobiologistes trépignent en effet de savoir ce que recèle l'océan caché par les glaces de la lune de Jupiter. Abriterait-il des organismes vivants ? Pourra-t-on mieux comprendre les étapes qui conduiraient à leur émergence ? Des découvertes promises aussi par d'autres scientifiques, qui n'ont pas quitté la planète Terre, eux, et s'aident d'intelligence artificielle (IA).

Interaction des protéines. Nonobstant le lot d'inquiétudes qu'elle transporte — selon un rapport en janvier du Fonds monétaire international, 60 % des emplois seraient affectés dans les économies avancées — l'IA fait miroiter moult avancées scientifiques. Ainsi l'algorithme AlphaFold de DeepMind, filiale d'Alphabet, pourrait encore progresser en 2024, selon le magazine *Nature*. Après avoir montré sa capacité à prédire la forme des protéines — origami fondamental qui explicite le mode d'action de ces machines moléculaires —, l'IA parviendrait à modéliser leurs interactions. À la clé, la mise au point de nouveaux médicaments. ■

COURRIER

« Le poisson, à consommer sous conditions »
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 923, janvier 2024)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Vous présentez les poissons pêchés en mer comme étant potentiellement pollués, notamment aux PCB et au méthylmercure. Est-ce à dire qu'il est préférable de consommer du poisson d'élevage, avec là aussi des risques liés aux antibiotiques et au contenu des farines ? **Gérald Brulas**

S. et A. : Il est tout à fait possible de consommer des poissons sauvages sans danger si l'on choisit les plus petits et ceux qui sont au début de la chaîne alimentaire, car moins susceptibles d'être contaminés par les polluants environnementaux. Tout dépend aussi des lieux de pêche plus ou moins pollués. On peut ainsi se tourner vers le saumon d'Alaska, car il vit dans des eaux plus saines. Concernant les poissons d'élevage (le plus souvent le bar, la daurade, le panga et le saumon), ils ont aussi fait l'objet de critiques, parmi lesquelles l'usage de farine de poissons et d'antibiotiques, sans oublier le fait qu'ils vivent parfois dans de piètres conditions. Toutefois les pratiques tendent à s'améliorer et l'on peut trouver du très bon saumon de Norvège. Des filières aquacoles françaises font aussi leur entrée, comme le « saumon de France », élevé dans la rade de Cherbourg.

Tempêtes bretonnes

Dans l'article « La bombe cyclonique Ciaran et l'importance des prévisions numériques » publié sur votre site Internet (sciav.fr/924ciaran), vous faites référence à la tempête « *oubliée* » de 1987. Oubliée par vous, mais aucun Breton ne l'a oubliée ! Contrairement à ce que dit Michel Jarraud [ancien secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale], la tempête Ciaran n'a, à l'échelle de la Bretagne, pas atteint l'ampleur de l'ouragan de 1987. **Daniel Christien**

Michel Jarraud : Je suis d'accord avec vous sur le fait que pour beaucoup, y compris moi-même, la tempête du 15 octobre 1987 n'est pas une « tempête oubliée ». Elle reste une tempête exceptionnelle, même s'il est difficile d'avoir un classement, car il y a de nombreuses manières de l'appréhender : intensité du vent (en rafales ou moyenné sur des périodes plus longues), étendue des zones affectées, victimes humaines, dégâts écologiques et économiques… La tempête avait été plutôt bien prévue en France, même si cette prévision n'était pas parfaite. Pour preuve, l'alerte émise par Météo France le 14 octobre. Ce bulletin a été envoyé à tous les centres départementaux de Météo France, aux autorités nationales et locales, aux journaux, radios, télévisions, EDF, la SNCF. Le 15 octobre, il fut décidé de confirmer les alertes précédentes. Il est vrai que la qualité des prévisions s'est améliorée de manière considérable depuis 36 ans, mais avec les outils actuels, il serait possible de donner l'alerte encore plus tôt aujourd'hui.

Précisions

MOELLE : Dans l'article sur la première greffe d'un œil complet (*S. et A.* n° 923, p. 22), il fallait lire que des cellules souches ont été extraites de la moelle osseuse du patient et non de sa moelle épinière, avant d'être injectées dans son nerf optique.

BILAN CARBONE : Dans la réponse au courrier de Vincent Robert (*S. et A.* n° 923, p. 6), nous avons affirmé par erreur que le calculateur en ligne CarbonFootprint comptabilisait le bilan carbone des vols d'avion, alors qu'il estime l'empreinte carbone de vols par passager en prenant en compte un remplissage moyen de l'avion.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche
france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Message d'espoir

« Mélancolie ». Ce n'est qu'au XIXe siècle que ce terme ancien désignant les troubles de l'humeur et pathologies de la tristesse revêtit une véritable dimension médicale. Quand on pense que, jusqu'au XVIIIe siècle, ceux que l'on qualifie aujourd'hui de dépressifs étaient communément enfermés dans des asiles, que de chemin parcouru ! Au XXe siècle, on commença à parler de « dépression ». Il y eut un vrai tournant à partir des années 1950 quand est apparue la prise en charge médicamenteuse, accompagnée d'une panoplie de psychothérapies toujours plus large. Par la suite, les pratiques vont s'affiner, et l'apparition du Prozac et d'autres médicaments ciblant la sérotonine marqua les années 1980. Depuis, l'association psychothérapie et médicaments reste l'option de choix, car leurs effets sur le cerveau sont de mieux en mieux connus. Pourtant, 20 % des malades résistent aux traitements. Heureusement, comme le montre le dossier que nous vous proposons ce mois-ci, de nouvelles pistes se dessinent. Tout d'abord, les médecins concèdent aujourd'hui que parler de dépression comme d'un trouble homogène est une erreur. Il faut préférer la désignation « troubles du spectre de l'humeur » *(p. 50)*. Une formulation certes plus complexe mais qui porte en elle la pluralité des cas et donc la nécessaire adaptation de la prise en charge. Parmi les nouvelles solutions : des traitements psychédéliques. Apparus dans les années 1960, ils font leur grand retour avec toute la prudence nécessaire au regard de leurs propriétés hallucinatoires. La stimulation magnétique du cerveau donne également des résultats prometteurs. Et, outre la voie médicamenteuse et celle des psychothérapies, une troisième voie de prévention et d'accompagnement est aujourd'hui solidement documentée : l'importance d'adopter un mode de vie sain *(p. 56)*. *« Il n'y a pas de fatalité génétique »*, insiste le psychiatre Guillaume Fond. Quand on sait qu'un Français sur cinq traversera un épisode dépressif au cours de sa vie, c'est un très grand message d'espoir. ■

> “Quand on pense que, jusqu'au XVIIIe siècle, ceux que l'on qualifie aujourd'hui de dépressifs étaient enfermés dans des asiles, que de chemin parcouru ! ”

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Thierry VERRET (dossier spécial nucléaire)
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, F. COSTES, C. COUMAU, D. DELBECQ, N. GUTIERREZ C., L. HESPEL, G. JACQUEMONT, C. JOURDAN, P. KALDY, E. NICOLAS, S. VIONNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et évènements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58
Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », un message « Challenges » et un encart « les Soldes L'Histoire » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; ainsi qu'un message « Linvosges » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

COURBATURES
MAUX DE TÊTE
FRISSONS
FIÈVRE

Retrouvez-nous
en pharmacie et
sur lehning.com

Si le symptôme pour lequel vous envisagez de prendre ce médicament évoque une infection COVID-19, contactez votre pharmacien ou votre médecin.

Médicament homéopathique traditionnellement utilisé dans le traitement des états grippaux (courbatures, fièvre, maux de tête, frissons). L52, solution buvable en gouttes. Aconitum napellus 3 DH, Arnica montana 3 DH, Belladonna 3 DH, Bryonia 3 DH, China rubra 3 DH, Drosera 2 DH, Eupatorium perfoliatum 3 DH, Gelsemium 6 DH, Senega 2 DH, Eucalyptus globulus TM. Demandez conseil à votre pharmacien. Lire attentivement la notice avant utilisation. Si les symptômes persistent, consultez votre médecin. Ce médicament contient de l'alcool. Pas avant 3 ans.

LEHNING
LABORATOIRES

Visa N°23/09/68789050/GP/001 - 2023-PI-044

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 924 / Février 2024

DOSSIER P. 48

Dépression : les pistes pour s'en sortir

De nouvelles stratégies thérapeutiques se mettent en place pour mieux cibler cette maladie aux formes hétérogènes, qui touche un Français sur cinq. Mais l'amélioration de la santé mentale passe aussi par un mode de vie plus sain.

P. 26

Ovnis : la Nasa va mener l'enquête

Grâce à ses techniques de pointe, l'agence spatiale américaine va apporter son expertise dans l'étude des « phénomènes anormaux non identifiés », dont les signalements sont en hausse.

P. 44

Quand les plantes dépolluent

Reportage sur un ancien site industriel où les chercheurs étudient la capacité d'espèces végétales à capter voire à détruire des polluants, métaux ou hydrocarbures.

P. 74

Révélation sur les funérailles chez Neandertal

De nouvelles fouilles de la « tombe aux fleurs », une célèbre sépulture néandertalienne en Irak, reposent la question de l'esthétisme funéraire chez notre proche cousin.

DOSSIER SPÉCIAL 32 PAGES AVEC Challenges

Nucléaire

La solution des petits réacteurs P. 91

5 **Éditorial** par Dominique Leglu

6 **Courrier**

7 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** L'Europe veut se doter d'un vaisseau spatial / Truquer les images pour se protéger des IA

26 **Ovnis : la Nasa va mener l'enquête**

32 **La révolution quantique s'attaque aux batteries**

36 **Le journal de l'IA : un assistant ambigu pour les scientifiques**

NATURE

16 **ACTUALITÉS** Un écosystème primitif unique a été découvert / Quand humains et oiseaux collaborent à la recherche du miel

38 **Climat : le délicat bilan carbone de l'industrie spatiale**

44 **Quand les plantes dépolluent**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** Les bienfaits d'un long jeûne nocturne / Une IA à l'origine d'une nouvelle classe d'antibiotiques

64 **La vérité sur les effets secondaires des vaccins anti-Covid-19**

68 **Comment les traumatismes se transmettent**

72 **Nutrition : ajuster son assiette pour affronter l'hiver**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Le dernier repas d'un jeune tyrannosaure / La ville qui résista au déclin de l'Empire romain

74 **Révélation sur les funérailles chez Neandertal**

79 **La plus vieille carte d'un territoire en Europe**

TRANSVERSALES

82 **Sélection livres**

84 **C'est à voir**

85 **Le ciel de février**

86 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

88 **Jeux**

90 **Questions de lecteurs**

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE - GEIPAN/CNES - ÉLÉONORE HENRY DE FRAHAN/COLLECTIF ARGOS POUR SCIENCES ET AVENIR - NMNH, SMITHSONIAN INSTITUTION

Susie, le prototype d'ArianeGroup, sera testé en vol dans les mois à venir avec un démonstrateur de 100 kg au décollage (vue d'artiste).

ARIANEGROUP

L'Europe veut se doter d'un vaisseau spatial

L'objectif de l'appel d'offres de l'Agence spatiale européenne est de créer un service de transport cargo à destination de la Station spatiale internationale. ArianeGroup est sur les rangs avec son projet Susie.

Le Conseil de l'Agence spatiale européenne (ESA) a lancé un appel d'offres pour développer un service de transport cargo vers la Station spatiale internationale (ISS) dès 2028. À l'approche du vol inaugural de son nouveau lanceur Ariane 6, prévu entre le 15 juin et le 30 juillet, ce nouveau programme de vaisseau spatial permet d'instaurer une compétition entre des entreprises européennes, à l'instar de ce que la Nasa a réalisé avec SpaceX ou Blue Origin. Plusieurs compagnies devraient se mettre sur les rangs, telle l'entreprise franco-allemande The Exploration Company ou la start-up allemande Rocket Factory Augsburg, qui développent respectivement les vaisseaux Nyx et Argo.

De son côté, ArianeGroup postulera sans doute avec son projet Susie (Smart upper stage for innovative exploration). Le 25 octobre 2023, l'entreprise avait dévoilé l'avancement de la capsule en procédant, sur son site des Mureaux (Yvelines), à l'une des premières mises à feu du moteur d'un prototype.

Une capsule entièrement réutilisable

« *Nous nous intéressons à la réutilisation totale du vaisseau,* explique Joost van Tooren, du service Programmes futurs d'ArianeGroup. *Pour cela, il faut concevoir un concept robuste, une enveloppe polyvalente qui pourrait s'adapter aux futurs marchés en fonction des besoins.* »

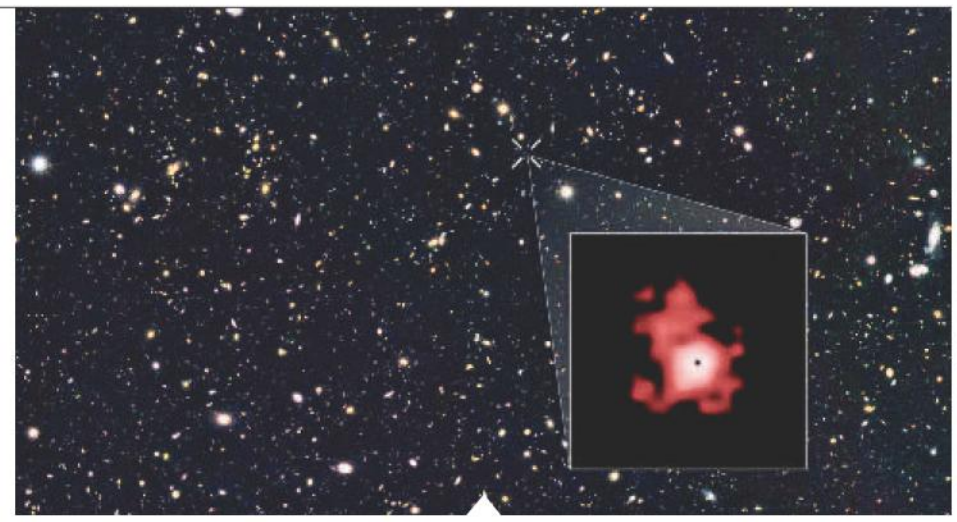
L'engin disposerait d'une large capacité cargo pour délivrer du fret à une station spatiale, d'une trappe d'ouverture de grandes dimensions (2,5 m contre 80 cm d'ordinaire) pour transporter des éléments d'infrastructures spatiales, et d'un bras articulé susceptible d'assurer une maintenance robotique ou la collecte de débris spatiaux. « *Nous avons optimisé une forme pour qu'elle puisse constituer le dernier étage d'Ariane 6 et une version plus petite qui pourrait être intégrée comme une charge utile sous la coiffe d'un lanceur* », détaille Joost van Tooren.

La première version de la famille Susie devrait avoir au décollage une masse de 3 tonnes et un volume de 12 m³. Le modèle au-dessus affiche 7 tonnes et 40 m³. Un premier démonstrateur de 100 kg devrait être testé dans les mois à venir en vue d'appréhender les phénomènes physiques de l'atterrissage lors des retours sur Terre. « *C'est une machine laboratoire autonome capable de différentes stratégies d'atterrissage,* expose Joost van Tooren. *Nous allons apprendre à gagner progressivement de l'altitude et à effectuer des trajectoires.* »

À terme, Susie pourrait évoluer en véhicule habité à destination des orbites basses — vers l'ISS ou de futures stations orbitales privées — ou lunaires, vers la future station Gateway, en orbite autour de la Lune. ■ **S. R.**

Un trou noir précoce défie les cosmologistes

Cette découverte bouscule les modèles de formation des galaxies.



NASA, ESA, AND P. OESCH (YALE UNIVERSITY)

Situé au cœur de la galaxie Gn-Z11, le trou noir supermassif (en gros plan) est né seulement 438 millions d'années après le Big Bang.

Ce trou noir bat tous les records de précocité. D'environ un million de masses solaires, il a été détecté par le télescope spatial James-Webb (JWST) au cœur de la galaxie Gn-Z11, seulement 438 millions d'années après le Big Bang. Autrement dit dans « l'enfance » de l'Univers, aujourd'hui âgé de 13,8 milliards d'années. Les chercheurs n'ont pas vu directement l'astre, bien trop lointain. Mais ils ont pu analyser l'émission électromagnétique de son disque d'accrétion, cet anneau de gaz et de poussières qui tourbillonne autour du gouffre cosmique avant d'y disparaître pour toujours.

La découverte d'un trou noir supermassif si tôt dans l'Univers continue de bousculer les modèles de formation des galaxies. La question étant de savoir comment autant de matière a pu s'agréger en si peu de temps…

Parmi les hypothèses envisagées, celle selon laquelle les trous noirs pourraient se former presque en même temps que les galaxies, par effondrement d'immenses nuages de gaz sur eux-mêmes, et non à l'issue d'un lent processus de fusion entre trous noirs plus petits. **F. N.**

EN DEUX MOTS

NEIGE Des chercheurs suisses ont mis au point une intelligence artificielle capable de cartographier l'épaisseur du manteau neigeux à partir d'images satellite. **ESPACE** L'alunisseur privé lancé par la société Astrobotic, qui devait signer le premier atterrissage américain sur notre satellite depuis 50 ans, a échoué à rejoindre la Lune. **EXOBIOLOGIE** Acétylène, propylène, méthanol, éthane et cyanure d'hydrogène ont été identifiés dans les geysers d'Encelade, démontrant la richesse en molécules organiques de cette lune de Saturne.

ROBERT DOWNIE

Le phénomène « Steve » photographié au Canada.

Ceci n'est pas une aurore boréale

ASTROPHYSIQUE Cette palissade de lumières vertes surmontée d'un ruban violet ressemble à s'y méprendre à une aurore boréale. Il n'en est rien, selon une étude qui explique ce mystérieux phénomène baptisé « Steve ».
À l'inverse des aurores dues à l'interaction avec la haute atmosphère de particules chargées provenant du Soleil, les « Steve » se formeraient à partir d'électrons déjà présents à plus basse altitude. **H. J.**

SOURCE : CLAIRE GASQUE, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

95 %

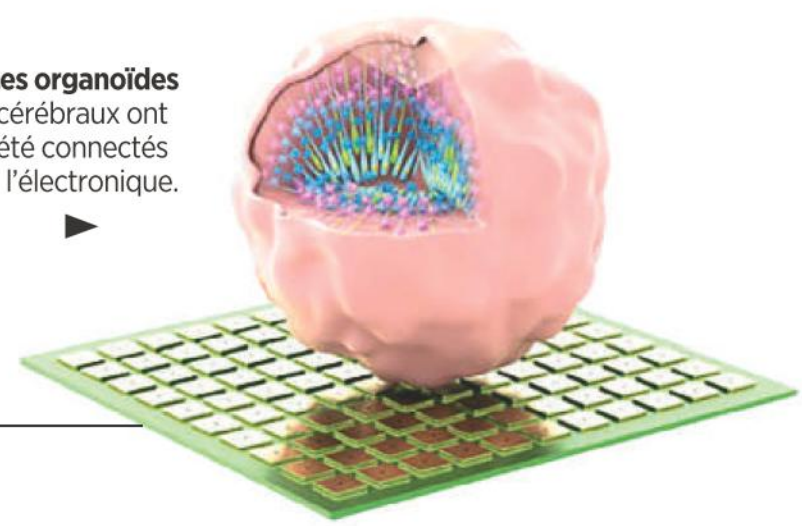
Les chances qu'une supernova soit observable cette année

La nova récurrente T Coronae Borealis (T CrB) issue d'une étoile binaire a été le théâtre de plusieurs éruptions au cours des siècles, dont la première observation date du Moyen Âge (1217). Elle devrait entrer en éruption au premier semestre de cette année, 78 ans après la dernière observation de 1946. J. I.

Des puces informatiques avec des neurones humains

ÉLECTRONIQUE Une équipe américaine publie une étude montrant qu'il est possible d'utiliser des cellules cérébrales humaines comme composants électroniques spécialisés dans l'intelligence artificielle. Les chercheurs ont en effet réussi à connecter des organoïdes cérébraux, petits amas de neurones cultivés en laboratoire, à de l'électronique classique pour y envoyer un signal d'entrée et en récupérer un signal de sortie. **S. V.**

SOURCE : HONGWEI CAI, UNIVERSITÉ DE L'INDIANA, ÉTATS-UNIS.



H. CAI ET AL.

Les organoïdes cérébraux ont été connectés à l'électronique. ►

NASA

Les tomates perdues de l'ISS refont surface

ESPACE Il y a huit mois, deux tomates cerises cultivées à bord de la Station spatiale internationale (ISS) avaient mystérieusement disparu. À tel point que l'astronaute de la Nasa Franck Rubio, qui avait procédé à la récolte, était soupçonné d'avoir cédé à la tentation de les manger... Il n'en est rien, les deux petits fruits d'à peine 2,5 cm de diamètre ont finalement été retrouvés dans un état de décomposition avancé *(photo ci-contre)*. Franck Rubio est donc innocenté. **H. J.**

1 % Le risque qu'une étoile errante détruise la Terre

COSMOLOGIE La probabilité qu'une étoile intergalactique passe à une distance trop proche du Soleil au cours du prochain milliard d'années est très faible, mais non nulle, montre une étude. Ce passage pourrait entraîner une collision entre Vénus et la Terre (0,48 %) ou pousser notre planète (0,24 %) en direction du Soleil. **F. D.**

SOURCE : SEAN RAYMOND, LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE DE BORDEAUX, FRANCE.

NASA, ESA, CSA, STSCI, D. MILISAVLJEVIC, T. TEMIM, I. DE LOOZE

Cette bulle de matière, résultant de l'explosion ancienne d'une étoile, a été photographiée par le télescope James-Webb.

L'IMAGE DU MOIS

Gros plan sur Cassiopée A

ASTRONOMIE Rémanent d'une supernova remontant au XVII^e^ siècle, Cassiopée A vient d'être observé à deux reprises en 2023 par le télescope spatial James-Webb de la Nasa. Il apparaît comme une bulle de gaz et de matière éjectés par la déflagration stellaire sur près de 10 années-lumière. Mais des questions demeurent : les astronomes ne comprennent pas pourquoi les vues réalisées (dans les infrarouges moyen et proche) apparaissent si différentes l'une de l'autre. **J. I.**

L'astuce chimique d'un expresso plus intense

Un taux d'humidité suffisant des grains réduira la formation de grumeaux lors de la percolation du café.

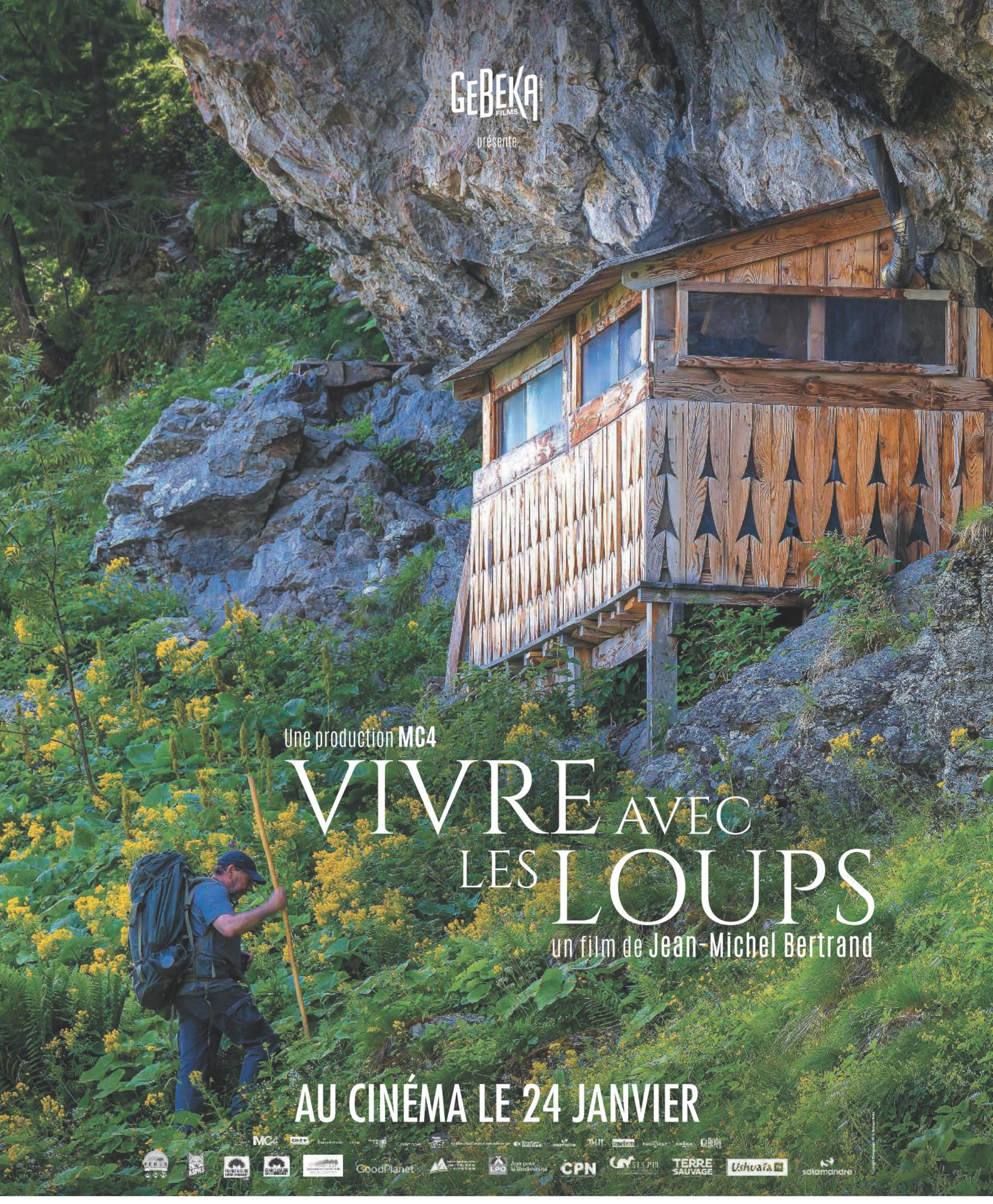
Avant de moudre des grains de café, il faut ajouter une petite quantité d'eau pour obtenir des expressos à la fois plus intenses et plus homogènes, tout en réduisant de 10 % la matière première utilisée. C'est la conclusion d'une étude du département de chimie de l'université d'Oregon (États-Unis), qui montre que lors du broyage des grains, les forces de friction créent de l'électricité statique sur les particules de café, ce qui conduit celles-ci à interagir, à s'agglutiner et à s'accrocher sur le moulin. Le niveau de torréfaction (cuisson des grains) et le diamètre des particules pourront influencer la quantité de charges électriques. Mais le facteur prédominant, c'est le taux d'humidité des grains. Un soupçon d'eau (20 microlitres par gramme) réduira ainsi au minimum l'électricité statique, donc la formation de grumeaux. Lors de la percolation du café, l'eau chaude sous pression se diffuse alors de manière plus complète et plus uniforme, avec un temps d'extraction plus long et davantage d'arômes libérés. Les expressos seront par ailleurs beaucoup plus similaires d'une tasse à une autre. **F. D.**

PLAINPICTURE

Lors de la percolation, l'eau chaude se diffusera mieux et plus d'arômes seront libérés si les grains de café ont été humidifiés avant le broyage.

Le plus grand réacteur à fusion inauguré au Japon

PHYSIQUE Mesurant 15,5 mètres de haut et 13,5 mètres de large pour une masse de 2600 tonnes, le tokamak JT-60SA est désormais le plus grand réacteur expérimental à fusion nucléaire au monde. Il a été inauguré à l'Institut de fusion de Naka, au Japon, après une dizaine d'années de travaux d'un coût dépassant 600 millions de dollars. Les gaz ionisés et extrêmement chauds qu'il produira ne serviront pas à produire de l'énergie mais à étudier le comportement d'un plasma de 135 m^3. Un record. **F. D.**



M'INTÉRESSE
TERRE SAUVAGE
Le monde grandeur nature
ebra GROUPE
Ushuaïa TV

La comète de Halley est sur le retour

ASTRONOMIE La plus célèbre des comètes se trouvait à 5,3 milliards de kilomètres du Soleil le 9 décembre dernier, le point le plus éloigné de son orbite. Le petit astre de 15 km de long entame ainsi son long retour vers le Soleil, avec qui il a rendez-vous à l'été 2061. À la même époque, la comète sera normalement visible dans le ciel, près de 76 ans après son dernier passage. **F. N.**

AFP

Le dernier passage de la comète remonte à 1986.

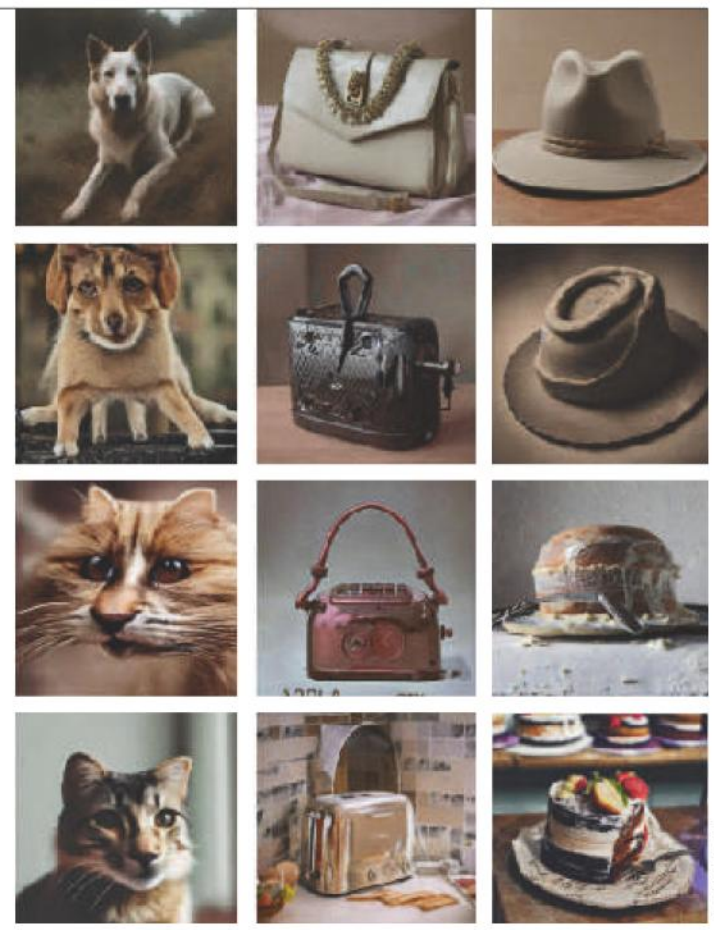
Fission nucléaire dans les étoiles

ASTROPHYSIQUE Les premières preuves d'un processus de fission nucléaire dans les étoiles auraient été identifiées. L'analyse de la composition chimique de 42 étoiles a mis en évidence une corrélation étroite entre certains métaux (fer, rhodium et palladium) et des terres rares (europium, holmium, dysprosium). Elle ne s'expliquerait que par l'existence de noyaux atomiques « superlourds » ayant fissionné. **F. D.**

SOURCE : IAN ROEDERER, UNIVERSITÉ DU MICHIGAN, ÉTATS-UNIS.

Truquer les images pour se protéger des IA

Une technique informatique originale pourrait éviter le pillage des visuels sous droit d'auteur.



S. SHAN ET AL.

L'outil perturbe l'entraînement de l'algorithme et fausse les résultats.

Si Dall-E 2, Midjourney ou Stable Diffusion peuvent produire des visuels d'une qualité fascinante à partir d'instructions textuelles, c'est parce que ces outils d'intelligence artificielle (IA) sont entraînés sur des volumes gigantesques d'images (photos, tableaux, œuvres graphiques de tout type) trouvées sur le Web, dans des conditions peu claires et sans l'accord des auteurs. Pour protéger le droit des artistes, une équipe de l'université de Chicago (États-Unis) a présenté une solution technique, Nightshade, reposant sur le principe de « l'attaque adversaire » : elle retourne le fonctionnement d'un outil informatique contre lui-même. Les chercheurs modifient les fonctions mathématiques de l'image, ajoutent des pixels invisibles. À l'œil nu, celle-ci est inchangée, mais la manipulation va perturber l'entraînement d'un algorithme et l'outil produira un visuel qui ne correspond pas à celui demandé. Par exemple, le mot « sac à main » générera un grille-pain, « chien » deviendra un chat ou « chapeau » finira par faire apparaître un gâteau ! **A. D.**

IL A DIT

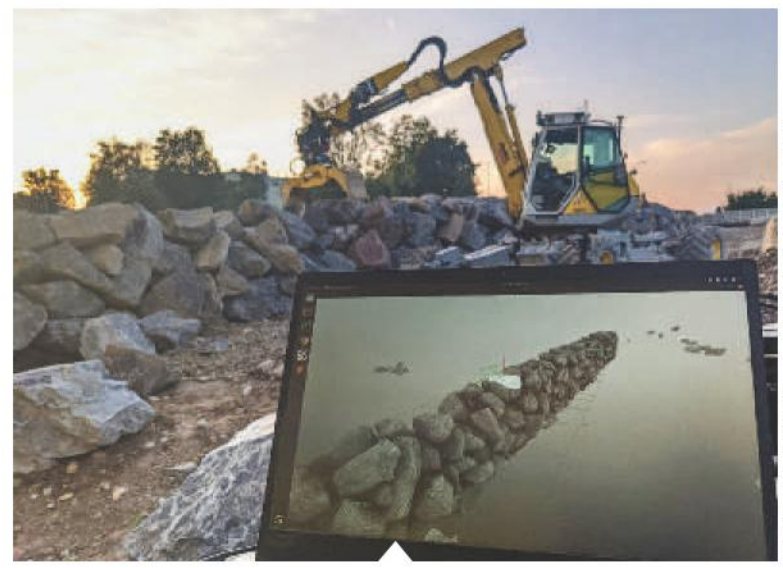
« Nous ajustons notre calendrier pour viser Artemis 2 en septembre 2025, et Artemis 3 en septembre 2026 »

Bill Nelson, patron de la Nasa, annonçant le report des prochaines missions habitées vers la Lune, initialement programmées pour fin 2024 et fin 2025. C'est au cours d'Artemis 3 que des astronautes refouleront le sol lunaire, une première depuis 1972.

Un mur construit par une tractopelle autonome

ROBOTIQUE Un mur en pierres sèches de 6 mètres de haut et 65 mètres de long, c'est l'ouvrage qu'une excavatrice autonome a pu ériger sans intervention humaine. Programmé par des chercheurs suisses, l'engin est capable de scanner de grosses pierres dans son environnement, d'enregistrer leur poids et d'identifier leur centre de gravité. L'algorithme détermine alors la meilleure position pour chaque bloc avant que l'excavatrice ne le dépose. **H. J.**

SOURCE : RYAN LUKE JOHNS, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZURICH, SUISSE.



GRAMAZIO KOHLER RESEARCH, ETH ZURICH, EBERHARD AG

L'excavatrice robotisée a construit un mur de 6 m de haut et 65 m de long en pierres sèches.

tech & fest

CÉLÉBRER LE MEILLEUR DE L'INNOVATION, ENSEMBLE !

10 000 visiteurs BtoB • 3 000 jeunes • +500 startup

Votre billet gratuit
avec le code
SCIENCES

1ÈRE ÉDITION

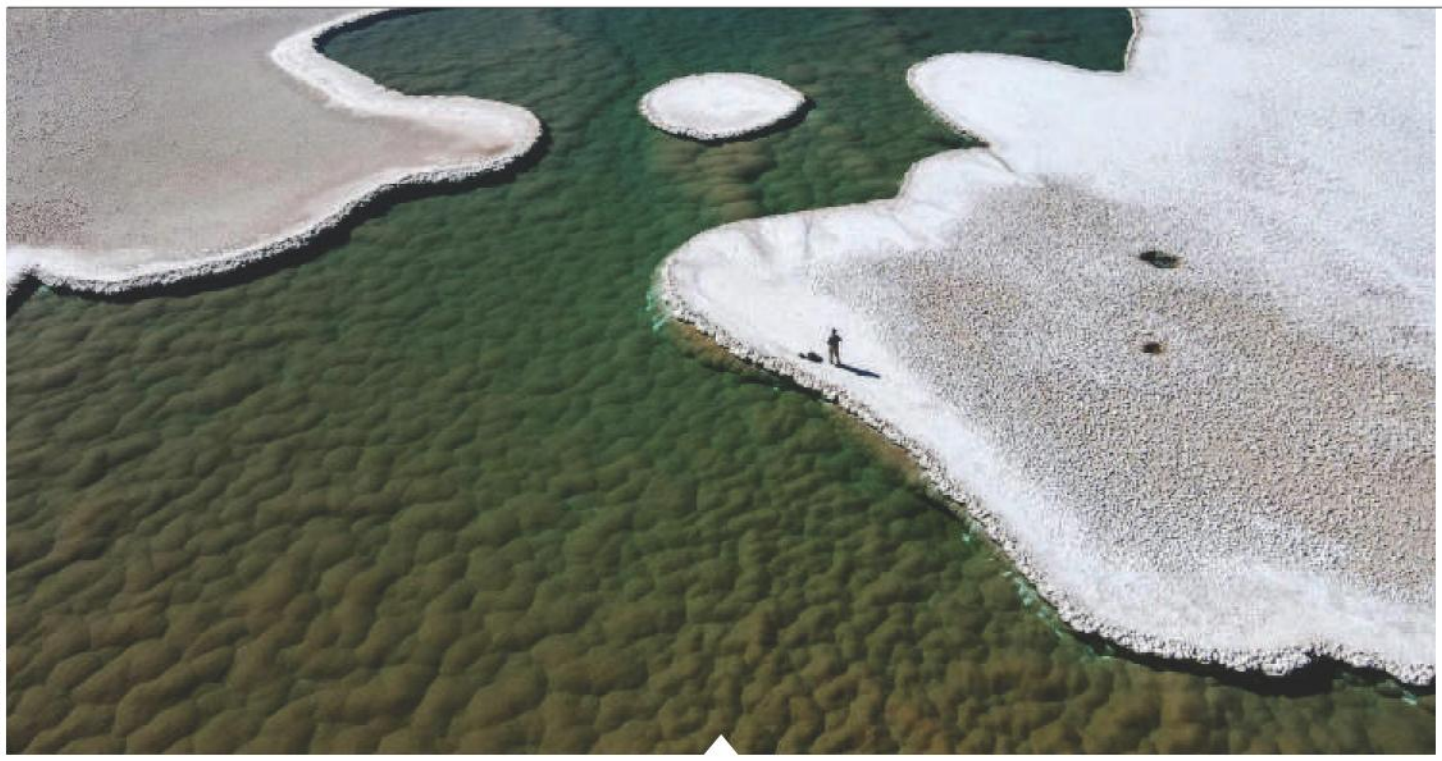
1-2 FÉVRIER 2024

ALPEXPO GRENOBLE

PARMI 100 SPEAKERS, VOUS RENCONTREREZ NOTAMMENT

REJOIGNEZ DÈS MAINTENANT LA COMMUNAUTÉ DES ENTREPRISES LES PLUS INNOVANTES DE FRANCE !

www.tech-fest.fr



BRIAN HYNEK

Les stromatolites verts qui tapissent le fond des lagons salés sont constitués d'une couche externe de cyanobactéries.

Un écosystème primitif unique a été découvert

Sur un haut plateau en Argentine, un réseau d'eaux salées cristallines va permettre d'étudier les tout premiers développements de la vie sur Terre.

À quelque 4000 mètres d'altitude, dans l'un des environnements les plus hostiles à la vie, un écosystème jusque-là inconnu des scientifiques a pu être étudié. Le fruit de ces recherches a été présenté en décembre au congrès annuel de l'Union américaine de géophysique, qui s'est tenu à San Francisco. C'est en avril 2022 que le géologue américain Brian Hynek et la microbiologiste argentine Maria Farías parviennent à un village perché à plus de 3600 mètres d'altitude sur le haut plateau de Puna de Atacama, en Argentine. En analysant des images satellitaires de la région, Brian Hynek repère alors d'intrigantes étendues d'eau situées non loin de là. Parvenus non sans mal à rejoindre le site, les chercheurs y découvrent un réseau de 12 lagons d'eaux salées cristallines qui s'étendent sur une dizaine d'hectares et dont les fonds sont tapissés de stromatolites verts qui ne ressemblent à rien de connu ! Les stromatolites sont les premières preuves fossiles de la vie sur Terre.

Des monticules de grand diamètre

Ces monticules rocheux ont été formés couche après couche il y a quelque 3,5 milliards d'années par des communautés microbiennes, quand l'atmosphère de la Terre primitive était surtout constituée de CO_2. C'est la photosynthèse de ces communautés probablement constituées de cyanobactéries qui a permis d'augmenter la teneur en oxygène de l'atmosphère terrestre.

Mais, alors que les stromatolites modernes sont relativement petits comparés à leurs ancêtres qui pouvaient atteindre 6 mètres de diamètre, ceux de Puna de Atacama présentent pour certains des diamètres allant jusqu'à 4,5 mètres, plus proches des standards de l'archéen que ceux de leurs contemporains. Une analyse plus précise des stromatolites de Puna de Atacama montre qu'ils sont constitués d'une couche externe de cyanobactéries et d'un noyau riche en archées, des organismes unicellulaires familiers des environnements extrêmes. Pour Brian Hynek, il s'agit là de l'un des meilleurs laboratoires naturels permettant d'étudier les tout premiers développements de la vie sur Terre, il y a 3,5 milliards d'années. ■ **S. R.**

JOHN MURILLO

Le tangara émeraude bilatéralement gynandromorphe.

Un oiseau mi-mâle, mi-femelle

ORNITHOLOGIE

Photographié en Colombie, ce tangara émeraude (*Chlorophanes spiza*) présente très distinctement, de son côté droit, un plumage bleu correspondant à celui d'un mâle, et de son côté gauche, le plumage vert d'une femelle. Un rare phénomène de gynandromorphisme bilatéral qui conduirait le spécimen à posséder un ovaire à gauche et un testicule à droite, sans que les chercheurs n'aient pu toutefois le vérifier. **A.-S. T.**

SOURCE : HAMISH SPENCER, UNIVERSITÉ D'OTAGO, NOUVELLE-ZÉLANDE.

23 %

La part des émissions carbone dues aux incendies venant du Canada

En 2023, près d'un quart des émissions de carbone provenant des incendies sur la planète était dû aux feux qui ont affecté le nord du Canada de mai à septembre. 480 millions de tonnes de CO_2 sont ainsi parties dans l'atmosphère. Au total, les incendies dans le monde ont émis l'an dernier 2,1 milliards de tonnes de carbone, soit environ 5,7 % des émissions mondiales. **L. C.**

SOURCE : SERVICE DE SURVEILLANCE DE L'ATMOSPHÈRE COPERNICUS.

La « neige marine » emprisonne plus de carbone que prévu

CLIMATOLOGIE Bonne nouvelle : l'océan stockerait 20 % de carbone de plus que les estimations du Giec, soit 15 milliards de tonnes supplémentaires par an, selon une étude publiée dans *Nature*. En effet, le phytoplancton transforme par photosynthèse le CO_2 en tissu organique. À leur mort, ces cyanobactéries coulent sous forme de « neige marine » au fond de l'océan. **H. J.**

SOURCE : FRANÇOIS PRIMEAU, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

ELLE BAUMGARTEL

Cette femelle border collie connaît le nom de plus de 50 jouets.

Un projet identifie les chiens surdoués

ÉTHOLOGIE Certains chiens affichent des performances cognitives hors du commun, au point de connaître le nom de plus d'une centaine de leurs jouets ! C'est ce qui ressort d'un projet de science participative, Genius Dog Challenge, lancé il y a cinq ans et ayant identifié 41 de ces surprenants compagnons dans neuf pays, mais pas encore en France. Parmi eux, 23 borders collies, réputés pour leur intelligence, mais aussi trois labradors ou encore un pékinois et un shih tzu. H. R.

SOURCE : SHANY DROR, UNIVERSITÉ DE BUDAPEST, HONGRIE.

240 000

Le nombre moyen de nanoplastiques détectables par litre d'eau en bouteille

POLLUTION Une nouvelle technique de microscopie laser a pu détecter entre 110 000 et 370 000 particules de plastique par litre de 11 marques d'eau en bouteille. Soit 240 000 en moyenne, dont 90 % de nanoplastiques (moins d'un micromètre). **H. J.**

SOURCE : NAIXIN QIAN, UNIVERSITÉ COLUMBIA, ETATS-UNIS.

TONGA GEOLOGICAL SERVICES/ZUMA PRESS WIRE/ABC/ANDIA.FR

À VOIR SUR LE NET

Les ravages de l'éruption du Hunga Tonga

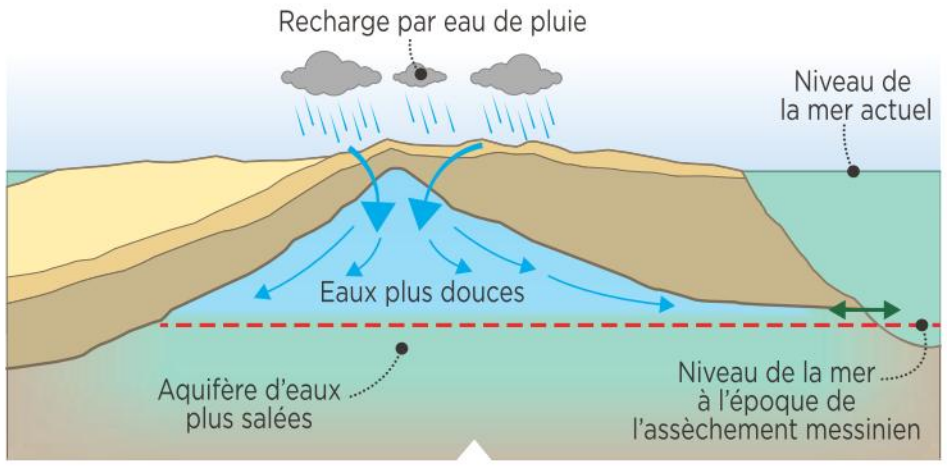
OCÉANOGRAPHIE Une cartographie exhaustive du fond océanique autour du volcan sous-marin Hunga Tonga dans le Pacifique, établie par l'Institut national néo-zélandais de recherche sur l'eau et l'atmosphère, dévoile l'ampleur des dégâts de l'éruption de janvier 2022 *(photo ci-contre)*. Les courants de densité provoqués par de véritables avalanches sous-marines ont déplacé 10 km^3 de fonds marins et tout balayé dans un rayon de 20 km autour du volcan. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Une vaste réserve d'eau douce en Sicile

Cet aquifère fossile découvert par des géologues se serait formé il y a 6 millions d'années.

Alors que le manque d'eau se fait criant dans le bassin méditerranéen, des géologues italiens ont détecté la présence d'un aquifère fossile de plus de 17 km^3 dans le sud de la Sicile (Italie). Ils ont pour cela réalisé une modélisation des roches carbonatées de la région à l'aide de données enregistrées lors d'anciens forages de puits d'hydrocarbures. Selon leurs conclusions, le réservoir d'eaux douce et saumâtre, stockée entre 800 et 2100 m de profondeur, s'est formé il y a 6 millions d'années, lors de la « crise messinienne ». La Méditerranée connaissait alors une période d'isolement de l'océan mondial qui a conduit à une baisse de son niveau de 2400 m par rapport au niveau actuel de la mer. L'infiltration d'eaux de pluie a permis de constituer cette réserve d'eau douce qui s'est ensuite trouvée piégée lorsque les conditions marines ont été rétablies au jurassique. Cette découverte ouvre des perspectives pour la région et « *d'autres régions côtières méditerranéennes, qui partagent des conditions géologiques et des problèmes de pénurie d'eau similaires* », selon les chercheurs. **S. R.**



BRUNO BOURGEOIS

17 km^3 d'eau douce, fournie par les pluies, ont été piégés dans des roches à l'époque de l'assèchement de la Méditerranée.

TOM STACK / WATERFRAME / ALAMY / PHOTO12

Les décharges électriques de l'anguille ouvrent des pores dans les cellules des poissons.

Les anguilles modifient l'ADN des poissons

ICHTYOLOGIE En plaçant des anguilles et des larves de poisson-zèbre dans un aquarium contenant de l'ADN codant une protéine fluorescente, une équipe a montré que les impulsions électriques émises par les premières ouvrent des pores dans les membranes cellulaires des secondes, permettant au matériel génétique de s'intégrer à leurs cellules. Les larves devenaient brillantes, preuve qu'elles avaient absorbé la protéine fluorescente. **H. J.**

SOURCE : SHINTARO SAKAKI, UNIVERSITÉ DE NAGOYA, JAPON.

IL A DIT

« Nous avons organisé dans le nord du pays les premières récoltes de nouvelles variétés de riz modifié pour supporter la pénurie d'eau et le changement climatique »

Hamdi Al-Mowafi, chercheur au Centre égyptien de recherche agricole.

Les cigales périodiques écoutées par la fibre optique

ENTOMOLOGIE Connues pour sortir de terre tous les 17 ans environ aux États-Unis, les cigales périodiques font tant de bruit qu'elles ont pu être détectées par les perturbations sonores qu'elles provoquaient sur un tronçon de fibre optique. C'est la colonie dénommée Brood X, faite de plusieurs milliards d'individus, qui a pu être écoutée lors de sa sortie en 2021. La prochaine sortie de terre est prévue pour 2038 ! **A.-S. T.**

SOURCE : SARPER OZHARAR, UNIVERSITÉ DE PRINCETON, ÉTATS-UNIS.

PHILIP DALTON / NATUREPL

Nymphe de cigale périodique muant.

Quand oiseaux et humains collaborent à la recherche du miel

CLAIRE SPOTTISWOODE

Le grand indicateur conduit les hommes aux nids d'abeilles sauvages.

ORNITHOLOGIE Une étude menée au Mozambique et en Tanzanie montre que les grands indicateurs, une espèce d'oiseaux collaborant avec les humains pour les guider vers des ruches à miel, répondent plus volontiers aux appels des humains qui proviennent de leur propre région. L'analyse des enregistrements de différents signaux émis dans plusieurs régions pratiquant cette quête partagée indique qu'il s'agit d'un rare phénomène de coévolution culturelle. **E. N.**

SOURCE : CLAIRE SPOTTISWOODE, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

PHILIPPE CIAIS / LSCE

QUESTIONS À

Philippe Ciais

Membre du Global Carbon Project. Directeur associé du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA)

« L'accord de la COP28 ne suffira pas »

Bien qu'ambitieux en apparence, l'appel à une transition hors des énergies fossiles, signé lors de la COP28 à Dubaï (Émirats arabes unis) en décembre, ne devrait pas permettre de réfréner le réchauffement de la planète.

À quelles échéances risque-t-on d'atteindre un réchauffement de +1,5 °C ou de +2 °C ?
Au niveau actuel des émissions, notre équipe estime qu'il y a 50 % de chances que le réchauffement climatique dépasse 1,5 °C dans environ sept ans. En 2022, les émissions mondiales ont dépassé les 40 milliards de tonnes d'équivalent CO_2 et ont continué d'augmenter de 1,1 % en 2023. Il reste 275 milliards de tonnes à consumer pour atteindre 1,5 °C de réchauffement, 1150 milliards pour les 2 °C.

Que faudrait-il pour repousser ces échéances ?
Pour rester sous +1,5 °C, il faudrait réduire les émissions de 8 % par an pendant sept ans, puis cesser toute émission. Il y a toutefois des incertitudes sur la capacité de stockage des puits terrestres (les végétaux) grâce à la reforestation ou au déploiement des technologies de capture du CO_2. Selon la plupart des scénarios, le seuil de 1,5 °C serait dépassé temporairement pour une redescente de la température après 2050.

L'accord trouvé à la COP28 permettra-t-il de s'en éloigner ?
Non. Il ne donne pas de trajectoire à suivre et tout repose sur la bonne volonté des États à respecter leur contribution. Les émissions devraient connaître un pic dans les prochaines années, alors qu'elles devraient déjà commencer à baisser.

Propos recueillis par L. C.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

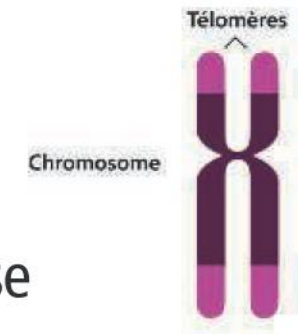
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

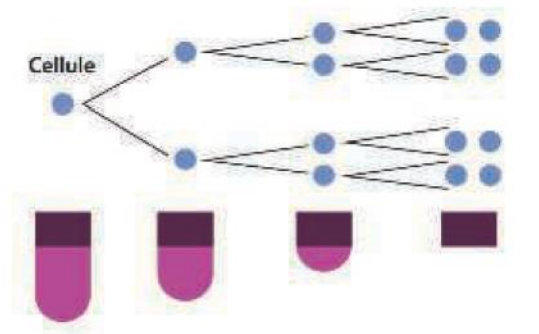
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

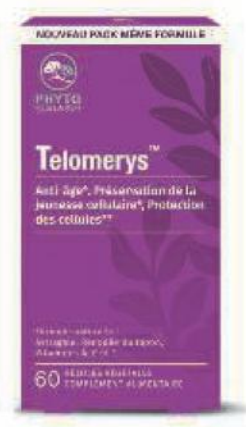
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

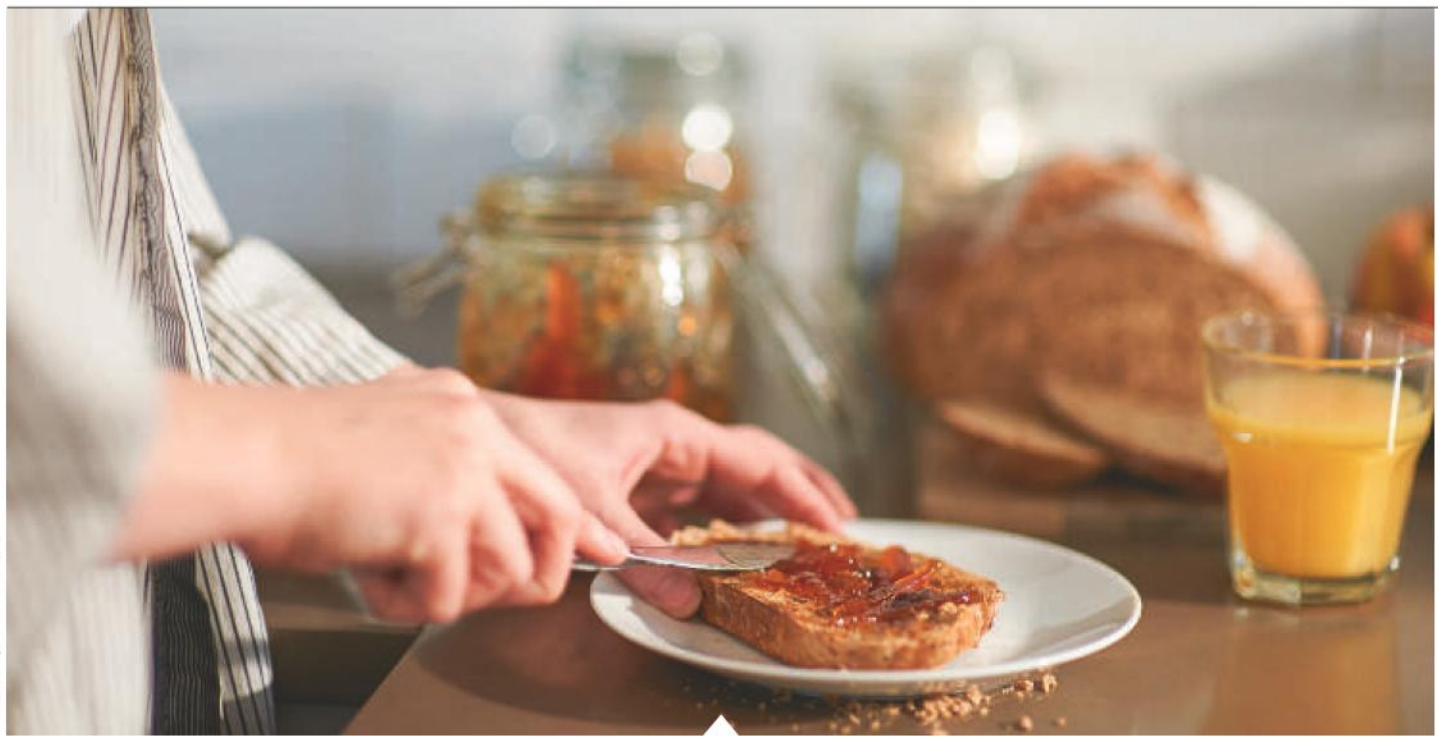
Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 84 20 63 78** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ :
Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



D. WATERS/GETTY IMAGES

Petit-déjeuner à 9 h augmenterait le risque de maladies cardio-vasculaires de 6 % par rapport à un repas pris à 8 h.

Les bienfaits d'un long jeûne nocturne

Pour diminuer les risques de maladies cardio-vasculaires, il faudrait prendre son premier repas tôt et ne pas prendre le dernier trop tard.

L'heure à laquelle sont pris les repas pourrait avoir une influence sur le risque de développer des maladies cardio-vasculaires. C'est ce que révèle une étude pilotée par l'Inrae (Institut national de la recherche agronomique) et l'Inserm, avec l'Institut de santé globale de Barcelone (Espagne). Sur les 18,6 millions de morts par an qu'elles occasionnent dans le monde, près de 8 millions seraient ainsi attribuables à l'alimentation, selon le Global Burden of Diseases (2019). Et parmi ces derniers, l'heure des prises alimentaires aurait elle-même un impact. En utilisant les données de près de 104 000 patients de la cohorte NutriNet-Santé suivie de 2009 à 2022, parmi lesquels 79 % de femmes, l'équipe dirigée par les professeurs en épidémiologie nutritionnelle Bernard Srour et Mathilde Touvier a pu analyser les associations entre les rythmes de prise alimentaire et les risques de maladies cardio-vasculaires.

Des pics de mélatonine, de cortisone et d'insuline

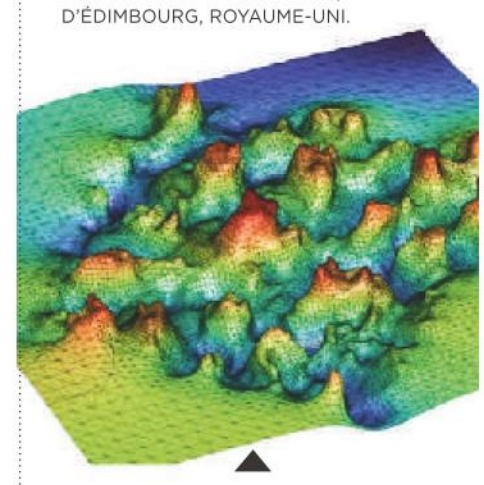
Leurs résultats, publiés dans *Nature Communications*, montrent l'importance de prendre son premier repas tôt, à condition de ne pas prendre le dernier trop tard. « *Plus la durée du jeûne nocturne — c'est-à-dire le temps séparant la dernière prise alimentaire de la journée de la première du lendemain — est longue, mieux c'est* », détaille Bernard Srour. Cette période doit cependant être synchronisée avec notre horloge circadienne, rythmée par le cycle jour/nuit. « *De fait, les pics de plusieurs hormones dépendent de cette horloge. Par exemple, la mélatonine, le cortisol et l'insuline sont différemment sécrétés selon le moment de la journée ou de la nuit, et ont une influence sur le métabolisme* », précise l'épidémiologiste.

Ainsi, l'étude suggère-t-elle de prendre son petit déjeuner le plus tôt possible, vers 8 h, et d'éviter de manger tardivement, après 21 h. En effet, une personne qui a pour habitude de manger pour la première fois à 9 h aurait 6 % de risque en plus d'avoir une maladie cardio-vasculaire qu'une personne qui a l'habitude de se sustenter à 8 h. Quant à la dernière prise alimentaire de la journée, manger après 21 h est associé à une augmentation de 28 % du risque de maladie cérébro-vasculaire, comme les AVC, par rapport à une dernière prise alimentaire avant 20 h, en particulier chez les femmes. ■ **H. R.**

Nos papilles gustatives sont uniques

ORL Tout comme les empreintes digitales, la structure des papilles gustatives et tactiles sur la langue sont uniques pour chaque individu. L'imagerie en microscopie 3D de plus de 2000 langues a servi à nourrir un modèle d'intelligence artificielle qui révèle que ces empreintes sont non seulement singulières, mais conditionnent les variations dans la perception des saveurs et des textures des aliments d'une personne à l'autre. **H. J.**

SOURCE : RAYNA ANDREEVA, UNIVERSITÉ D'ÉDIMBOURG, ROYAUME-UNI.



R. ANDREEVA ET AL.

Topographie des structures papillaires d'une langue humaine.

ELLE A DIT

« Les adultes malentendants qui utilisent un appareil auditif présentent un risque de mortalité de 24 % inférieur à ceux qui n'en portent jamais »

Janet Choi, chercheuse en neuro-otologie à l'université de Californie du Sud (États-Unis), résumant les résultats d'une étude de suivi, de 1999 à 2012, de personnes souffrant d'une perte auditive non traitée.

Image d'un œil d'embryon humain de 12 semaines obtenue au microscope à feuillet de lumière.

RAPHAEL BLAIN/ALAIN CHÉDOTAL, INSTITUT DE LA VISION

L'IMAGE DU MOIS

Première cartographie d'un embryon en 3D

IMAGERIE Une équipe française a réalisé la première cartographie 3D d'une tête d'embryon humain grâce à une technique alliant la biochimie et une optique sophistiquée, le microscope à feuillet de lumière. Celui-ci permet l'observation en temps réel et en 3D de processus intracellulaires. Ici, c'est l'œil vu en transparence d'un embryon humain de 12 semaines qui se dévoile. Les six muscles oculomoteurs responsables des mouvements des yeux et les trois nerfs moteurs (en blanc, vert et rouge) ont été colorisés à l'aide d'un logiciel de réalité virtuelle. S. R.-M.

SOURCE : RAPHAËL BLAIN, INSTITUT DE LA VISION, FRANCE.

6,6 %

Le recul de la natalité française en 2023

DÉMOGRAPHIE Seules 678 000 naissances ont été enregistrées en France en 2023, contre 725 997 en 2022. Soit un recul de 6,6 % de la natalité, qui établit le taux de fécondité à 1,68 enfant par femme en âge de procréer (contre 1,53 en moyenne dans l'Union européenne). Le nombre de naissances n'avait pas été aussi bas depuis 1945 (645 899, pour une population de 40 millions de personnes environ). **H. J.**

EN DEUX MOTS

VIEILLISSEMENT Une analyse par IA de 5000 protéines montre que chaque organe libère dans le sang un ensemble de protéines caractéristiques de son âge biologique. **DIAGNOSTIC** La Haute Autorité de santé a rendu un avis favorable à l'utilisation d'un test salivaire efficace à 95 % pour diagnostiquer l'endométriose, une maladie inflammatoire de l'utérus. **CANCER** Plus de 80 % des fumeurs opérés d'un cancer du poumon dépisté à un stade précoce étaient encore en vie 20 ans plus tard, rapporte une étude.

Une IA à l'origine d'une nouvelle classe d'antibiotiques

L'algorithme a passé en revue 12 millions de substances disponibles dans le commerce pour identifier des composés inédits.

Une nouvelle classe d'antibiotiques contre les bactéries *Staphylococcus aureus* résistantes aux médicaments (SARM) vient d'être découverte grâce à une intelligence artificielle. Une première depuis soixante ans, selon une étude américaine publiée dans *Nature*. L'équipe a d'abord testé les effets de plus de 39 000 composés sur le SARM et sur trois types de cellules humaines pour évaluer leurs propriétés antibiotiques et leur toxicité. Les résultats de ces tests ont permis de nourrir l'IA. L'algorithme a alors passé en revue 12 millions de substances disponibles dans le commerce et identifié 280 composés pertinents. Les tests en laboratoire ont retenu deux candidats issus de la même classe qui, chez la souris, sont parvenus à diviser par 10 la population de SARM. *« Notre modèle ne nous dit pas seulement quelles substances ont un effet antibiotique. Il nous montre aussi pourquoi leur structure chimique leur donne cette propriété »*, s'est réjoui Felix Wong, chercheur au Broad Institute du MIT (États-Unis) et coauteur de la publication. **C. L.**

SCIENCE SOURCE/PHANIE

Le staphylocoque doré est résistant à certains antibiotiques actuels.

VOISIN/PHANIE

Le psoriasis, maladie inflammatoire de la peau, concerne 2 % de la population en France.

Des démangeaisons dues à une protéine bactérienne

DERMATOLOGIE Les démangeaisons dans certaines maladies de la peau (psoriasis, dermite atopique...) ne sont pas dues à l'inflammation, mais à l'interaction d'une protéine, la protéase V8 produite par une bactérie, avec un récepteur cellulaire. Une bonne nouvelle car un traitement existe pour bloquer ce récepteur et éviter théoriquement les démangeaisons. **C. G.**

SOURCE : LIWEN DENG, ÉCOLE DE MÉDECINE DE HARVARD, ÉTATS-UNIS.

ROYAL TYRRELL MUSEUM OF PALAEONTOLOGY/COVER IMAGES/SIPA

Darla Zelenitsky, de l'université de Calgary, et François Therrien, du musée royal Tyrrell, avec le fossile du gorgosaure.

Le dernier repas d'un jeune tyrannosaure

Ce fossile découvert au Canada avait des proies dans son estomac.

C'est un fossile exceptionnel qui a été extirpé du cœur des Badlands, en Alberta (Canada) dans le Dinosaur Provincial Park : celui d'un jeune tyrannosaure abritant dans son estomac des restes de son dernier repas. À savoir, deux pattes de *Citipes elegans*, des petits dinosaures carnivores ressemblant à des oiseaux. *« C'est un fossile unique dans l'histoire d'une carrière ! »*, se réjouit Darla Zelenitsky, paléontologue à l'université de Calgary, qui l'a étudié. Effectivement, aucune grande espèce de tyrannosaure n'avait encore jamais été trouvée avec des proies dans son estomac. Le spécimen, examiné par les équipes du musée royal Tyrrell de paléontologie, à Drumheller, au nord de Calgary, correspond à un *Gorgosaurus libratus*, un tyrannosaure proche de l'*Albertosaurus*, lointain cousin du *T. rex*. À sa mort, il pesait 335 kg et était âgé de 5 à 7 ans, pour une espèce qui vivait une puberté autour de 11 ans et dont l'espérance de vie était d'une vingtaine d'années. *« D'après les examens menés, nous pouvons affirmer que le* Gorgosaurus *est mort dans la semaine qui a suivi l'ingestion de ses proies, et également que les deux pattes ont été avalées lors de deux repas différents, séparés de quelques heures »*, précise François Therrien, du musée royal Tyrrell.

Un changement de régime alimentaire

Cela suggère fortement une préférence alimentaire pour les petits carnivores chez les juvéniles et un changement ontogénétique de régime alimentaire : avant l'âge de 11 ans, les jeunes tyrannosaures étaient graciles et chassaient des proies adaptées à leur taille. *« Après 11 ans, ils devenaient beaucoup plus massifs et leur morsure était plus puissante. Les dents se transformaient aussi pour prendre la forme de bananes, longues et coniques, capables de déchirer de gros morceaux de chair et de broyer des os »*, raconte François Therrien. Outre son caractère contraint par des nécessités anatomiques, ce changement de diète présente certains avantages : puisque jeunes et adultes ne consommaient pas les mêmes proies, ils n'entraient pas en compétition et pouvaient donc cohabiter avec plus de sérénité dans le même écosystème. ■ **J. I.**

ITALIAN MINISTRY OF CULTURE / AFP

Datée de la fin du IIe siècle avant J.-C., la mosaïque est composée de coquillages, de fragments de verre et de marbre.

Une mosaïque incomparable mise au jour à Rome

ARCHÉOLOGIE

Un *« authentique trésor »* pour le ministère italien de la Culture, qui a annoncé la découverte d'une mosaïque *« incomparable »* ornant une villa romaine de la fin du IIe siècle avant J.-C. dans le Parc archéologique du Colisée, à Rome. Composé de coquillages, de fragments de verre et de marbre, l'ouvrage, qui figure trois navires, suggère une bataille victorieuse du propriétaire de cette « domus », probablement un sénateur. **H. J.**

IL A DIT

« Les œufs en coquille existent depuis des centaines de millions d'années, par exemple chez les dinosaures. Donc, l'œuf est venu en premier »

Sean Stankowski, chercheur à l'Institut des sciences et technologies d'Autriche, répondant à la question : *« Qui de l'œuf ou de la poule est apparu en premier ? »*

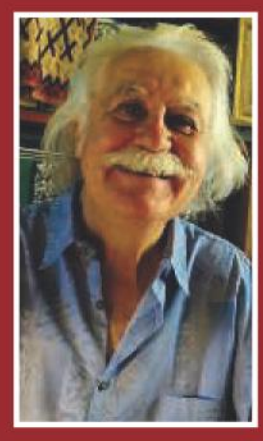
Les voyages du SAVOIR
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

ATAPUERCA, ALTAMIRA

évolution de l'humanité, évolution de l'art

du 25 au 29 septembre 2024

Découvrez ces sites préhistoriques majeurs en compagnie de :



JEAN-MICHEL GENESTE
Archéologue,
Conservateur général du patrimoine

ANTOINE BALZEAU
Paléoanthropologue, directeur de recherche au CNRS

Fouille Gran Dolina Photo Mario Modesto

Au cœur du chemin de Saint-Jacques **l'incroyable site d'Atapuerca**, joyau de l'archéologie, est considéré comme la pierre de Rosette de l'évolution de l'humain en Europe. Classé au Patrimoine mondial de l'Unesco, le site est un référent incontournable pour les recherches sur l'évolution humaine.

Altamira Photo : Yvon Fruneau © Unesco

Découverte en 1879 **Altamira**, « l'autre Sixtine de l'Occident », est la première grotte ornée qui, avant Lascaux, avant Chauvet, avant Cosquer a marqué l'histoire de la découverte et de l'étude de l'art du paléolithique.

Marine Benoit
Rédactrice
Archéologie
Histoire de Sciences et Avenir-La Recherche

Des ossements par milliers… le site d'**Atapuerca** est une mine d'or pour les paléontologues qui depuis des décennies, et encore aujourd'hui, exhument des spécimens rares qui permettent d'écrire – voire de réécrire – l'histoire de notre humanité.

Altamira, une légende dans la grande histoire de la découverte de l'art préhistorique européen qui s'est poursuivie avec Lascaux, Chauvet, Cosquer !

Quel privilège que de pouvoir découvrir les multiples découvertes réalisées sur le terrain en compagnie de ces deux grands scientifiques et de leurs collègues et amis locaux. Ils nous éclaireront sur les trésors que contiennent le musée de la Préhistoire et d'Archéologie de Santander et celui de l'Évolution humaine de Burgos, le plus grand centre dédié à ce thème en Europe.

Ne manquez pas ce **Voyage du Savoir** au nord de la péninsule Ibérique imaginé spécialement pour les lecteurs de Sciences et Avenir-La Recherche !

Au programme : **Burgos** : les fouilles d'Atapuerca, le musée de l'Évolution humaine ; **Puente Viesgos** : les grottes del Castillo ; **Santillana del Mar** : la réplique de la célèbre grotte d'Altamira ; **Santander** : le musée de la Préhistoire et d'Archéologie de Cantabrique ; **Zestoa** : la grotte d'Ekain.

4 nuits / 5 jours de Biarritz à Biarritz 1.670 € par personne en pension complète.

Organisation technique BLB TOURISME

PROGRAMME, RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :

blb-tourisme.bzh/voyages-du-savoir

Ou scannez

BLB TOURISME Zone de KERBOIS 15, Rue Yves de Kerguelen 56400 AURAY

Tél : 02 97 56 60 86 Courriel : inscription@blb-tourisme.com

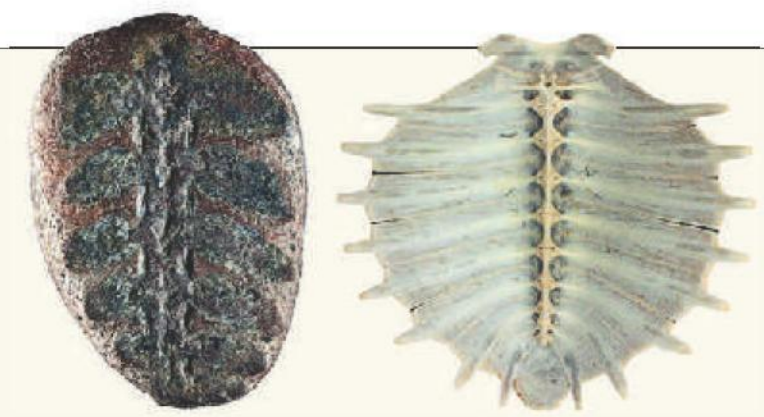
La ville qui résista au déclin de l'Empire romain

La longue prospérité d'une petite cité a été révélée par des fouilles récentes.

J.D. LAUWEREINS

L'ancien théâtre d'Interamna Lirenas, une petite colonie romaine du centre de l'Italie qu'on croyait mineure mais qui fut prospère durant plus de 900 ans.

La petite ville d'Interamna Lirenas, située dans le centre de l'Italie et jusqu'ici toujours considérée comme mineure, vient de modifier à elle seule notre compréhension de la chute de l'Empire romain. Une équipe de l'université de Cambridge (Royaume-Uni), qui a passé treize ans à en étudier les vestiges, conclut en effet dans une vaste étude que cette colonie latine fondée en 312 avant J.-C. a continué à prospérer jusqu'au IIIe siècle de notre ère. Plus intrigant encore, elle n'aurait pas amorcé son déclin avant le VIe siècle, soit 300 ans plus tard que précédemment supposé. La fouille de ce site, jugé d'abord *« peu prometteur »* par les archéologues, a notamment révélé des structures dignes d'une ville florissante : de grands entrepôts, des temples, des bains ou encore un riche théâtre couvert. Couplés à l'analyse des tessons de poteries, ces restes d'aménagements urbains complexes indiquent que la ville est restée prospère durant plus de 900 ans, avec une population qui a pu atteindre, à son apogée, jusqu'à 2000 habitants. **M. B.**



H.D. PALMA-CASTRO ET AL.

La bévue sur la tortue

PALÉONTOLOGIE Découvert au milieu du XXe siècle en Colombie et identifiée alors comme un végétal, un fossile de 5 cm de long *(photo à gauche)* vieux d'au moins 250 millions d'années, était en fait les restes… d'un bébé tortue ! Les côtes de l'animal vues de l'intérieur de la carapace avaient été interprétées à tort comme les nervures d'une plante. C'est en les comparant avec celles de tortues existantes *(à droite)* que les chercheurs ont rectifié l'erreur. Ils ont baptisé ces spécimens « Turtwig », un Pokémon mi-tortue, mi-végétal. **H. R.**

SOURCE : HÉCTOR PALMA-CASTRO, UNIVERSITÉ NATIONALE DE COLOMBIE.

1,75 milliard d'années

L'âge des plus anciennes bactéries photosynthétiques

ÉVOLUTION Les premières cyanobactéries capables d'une photosynthèse produisant de l'oxygène, à la manière des plantes, ont été retrouvées dans un microfossile datant d'il y a 1,75 milliard d'années. Soit 1,2 milliard d'années avant la plus ancienne preuve connue à ce jour de ces organismes à la base du règne végétal moderne. **C. G.**

SOURCE : CATHERINE DEMOULIN, UNIVERSITÉ DE LIÈGE, BELGIQUE.

73 momies en paquet intactes

ARCHÉOLOGIE Plusieurs dizaines de sépultures de la culture Huari, qui prospérait dans la région avant l'arrivée des Incas, ont été mises au jour sur le site de Pachacámac, au Pérou. Elles ont révélé 73 momies intactes dont la datation se situe entre 800 et 1100 après J.-C. Elles se présentent en paquets funéraires, ou *fardos*, une technique qui consistait à disposer le défunt en position assise, les genoux ramenés sur la poitrine, et à l'entourer de couches successives de textile. **M. B.**

SOURCE : KRZYSZTOF MAKOWSKI, UNIVERSITÉ PONTIFICALE CATHOLIQUE DU PÉROU.

M.GIERSZ, K.KOWALEWSKI

En position assise et repliée, une des momies étudiée par l'équipe de chercheurs.

Un improbable cimetière arctique

ARCHÉOLOGIE C'est en Laponie finlandaise, à 80 km au sud du cercle Arctique, sur le site de Tainiaro, qu'une équipe pense avoir découvert le cimetière de chasseurs-cueilleurs préhistoriques le plus au nord de l'Europe. Problème : sur ce site daté d'il y a 6500 ans, aucune trace de squelettes humains. Pourtant, l'analyse fine de 44 fosses montre qu'elles auraient bien accueilli des dépouilles humaines. **H. J.**

SOURCE : AKI HAKONEN, UNIVERSITÉ D'OULU, FINLANDE.

Un Apollon surgi d'une source thermale

ARCHÉOLOGIE Une statue de marbre monumentale de près de deux mètres de haut représentant un Apollon sauroctone (s'apprêtant à tuer un lézard) a été découverte dans l'une des 42 sources d'eau chaude de l'ancien site étrusco-romain de San Casciano dei Bagni, en Toscane (Italie). Amputé de ses bras et de sa tête, il a peut-être été brisé et caché dans l'un des bassins à la fermeture du sanctuaire, au début du Ve siècle lorsque la région se christianisait et que les lieux de cultes païens étaient détruits. **S. d. L.**

SOURCE : JACOPO TABOLLI, UNIVERSITÉ POUR ÉTRANGERS DE SIENNE, ITALIE.

UNIONE DEI COMUNI VALDICHIANA SENESE

Neandertal profitait de longues matinées

PALÉOANTHROPOLOGIE Ceux qui se lèvent aux aurores ont peut-être hérité cette habitude de nos cousins néandertaliens. Une étude s'est focalisée sur les gènes liés à l'horloge circadienne et a identifié chez les *H. sapiens* — qui hébergent ces gènes dans leur génome — des variants propres à Neandertal et associés à des réveils précoces. Ce dernier qui vivait plus au nord, profitait en se levant tôt d'une plus grande période d'ensoleillement. **J. I.**

SOURCE : JOHN CAPRA, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SAN FRANCISCO, ÉTATS-UNIS.

Les moustiques mâles du crétacé étaient hématophages

PALÉOENTOMOLOGIE Si aujourd'hui, les moustiques suceurs de sang sont exclusivement femelles, il n'en a pas toujours été ainsi. C'est ce que suggère la découverte d'un moustique mâle dans un morceau d'ambre libanais de plus de 100 millions d'années. Parfaitement préservé, celui-ci présente les mêmes mandibules dentelées dont les moustiques femelles modernes se servent pour percer l'épiderme de leurs proies. **H. R.**

SOURCE : DANY AZAR, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES.

DANY AZAR

J-B NADEAU/ONLYFRANCE.FR - NASA - A. HERZOG/EPFL - BRIDGEMAN IMAGES

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

CHIMIE

Les maux de tête dus au vin rouge

Un phénol particulier présent dans le vin rouge semble bloquer la voie métabolique menant à l'assimilation de l'alcool, même en faible quantité. Il provoquerait dans le foie l'accumulation de toxines responsables de maux de tête. Et contribuerait à expliquer la survenue de la « gueule de bois ». À lire sur le site de *La Recherche* : **https://bit.ly/924vin**

PODCAST

Sixième Science

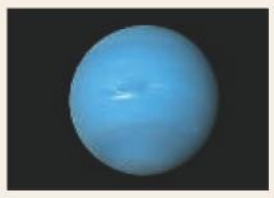
32 épisodes du podcast de *Sciences et Avenir* en partenariat avec *20 Minutes* ont été enregistrés en 2023, pour un total de 1,4 million d'écoutes. À retrouver sur notre site Web : **sciav.fr/924podcast**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Voici les couleurs de Neptune et Uranus



De nouvelles observations ont permis à une équipe de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) de rendre leurs vraies couleurs à ces deux géantes du Système solaire, à découvrir en vidéo.
sciav.fr/924uranus

5 minutes

Un troisième bras robotique

Des chercheurs sont parvenus à équiper une personne d'une prothèse faisant office d'un troisième bras contrôlé par les mouvements du diaphragme.
sciav.fr/924bras3

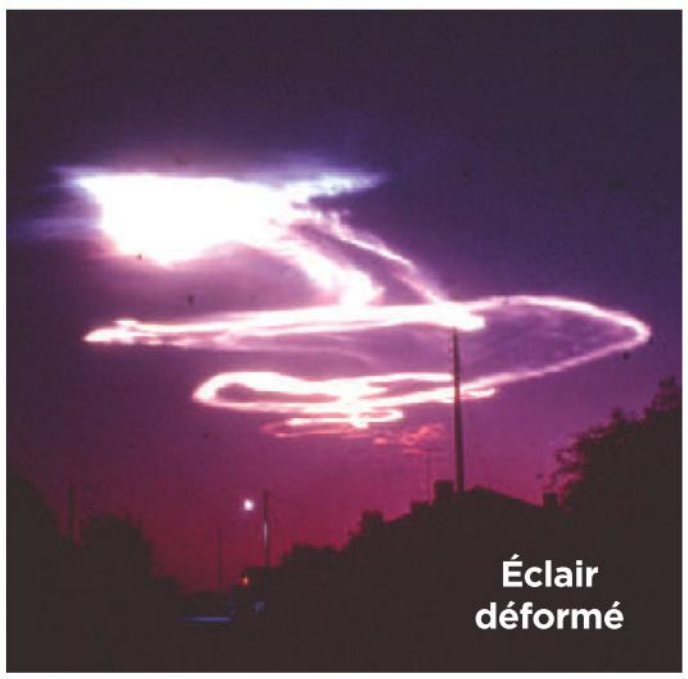
10 minutes

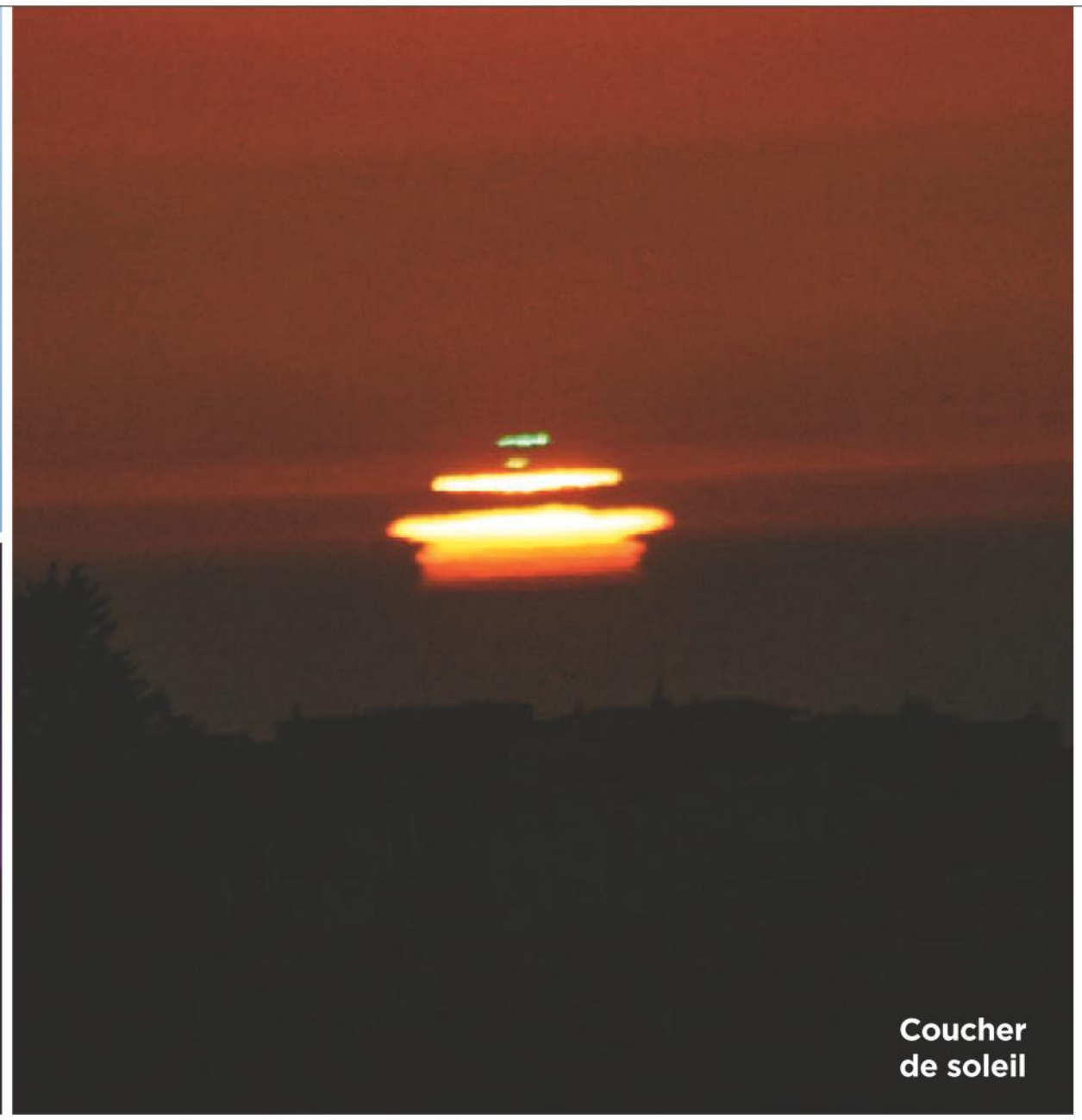
Aux origines des pestes antiques

Selon les auteurs antiques, les épidémies qui ont touché le monde méditerranéen provenaient d'Égypte. Mythe ou réalité ? Enquête.
sciav.fr/924pestes

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Ballon météo


Éclair déformé


Coucher de soleil

Reflet de néon

Farfadet

NASA ; GEIPAN/CNES ; WIKIPEDIA COMMONS ; GEIPAN ; STEPHEN CHUMMEL

La plupart des témoignages sur des ovnis se rapportent en réalité à des faits connus bien qu'insolites, par exemple des phénomènes météo (éclair déformé, farfadet) ou optiques (rayon vert du coucher de soleil ou reflet du néon de la cuisine d'où la photo a été prise !).

Ovnis
La Nasa va mener l'enquête

Face à la flambée des signalements de « phénomènes anormaux non identifiés », les États-Unis ont pris une décision inédite : impliquer la Nasa dans l'étude des ovnis. Avec ses équipements technologiques de premier plan comme l'observatoire Vera-Rubin ou ses nombreux satellites, l'agence spatiale américaine entend apporter son expertise scientifique.

Par Franck Daninos

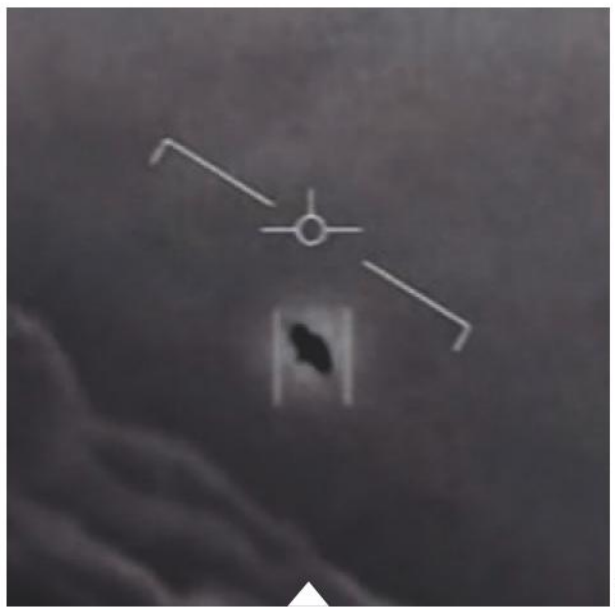
Janvier 2015, côte est des États-Unis. Lors de vols d'entraînement à bord d'avions de combat F/A-18 Super Hornet, plusieurs pilotes observent des objets aux caractéristiques très étranges. Ils se déplacent à des vitesses hypersoniques mais ne possèdent ni aile, ni queue ou panache d'échappement visibles. Or ces objets, dont certains ressemblent à une sphère enveloppant un cube, peuvent ralentir puis accélérer subitement. Ou manœuvrer d'une manière paraissant impossible à réaliser par un équipage humain… C'est ce qu'indiquent les pilotes de l'US Navy à l'appui de vidéos filmées par des caméras infrarouges. Révélées d'abord par la presse américaine, ces observations et d'autres du même type seront déclassifiées en 2020 par le département américain de la Défense. Et qualifiées par celui-ci de « phénomènes anormaux non identifiés » (Unidentified Anomalous Phenomena ou UAP), terme nouveau et moins connoté pour parler des fameux « ovnis » (objets volants non identifiés). Par la suite, les signalements d'UAP ont explosé : 247 entre 2021 et 2022, autant que lors des deux dernières décennies !

Face à cette flambée, les États-Unis ont pris une décision inédite : impliquer la Nasa dans l'étude des UAP. En septembre 2023, un panel d'experts ▶

diligenté par l'agence spatiale américaine présentait ainsi ses recommandations. « *C'est la première fois que la Nasa va prendre des mesures concrètes pour se pencher sérieusement sur le sujet* », soulignait à cette occasion l'administrateur de la Nasa Bill Nelson. Le panel n'a trouvé « *aucune preuve suggérant que les UAP ont une origine extraterrestre, mais nous ne savons pas ce que sont ces phénomènes* », a-t-il précisé. Avec un objectif : « *faire passer le débat du terrain du sensationnalisme à celui de la science* ».

Entre crédulité populaire et craintes militaires

Aux États-Unis, les ovnis sont devenus un sujet d'intérêt dès 1947. Un pilote amateur raconta alors à un journal local avoir aperçu une mystérieuse formation d'objets volants à proximité du mont Rainier (État de Washington). Ils semblaient comme attachés l'un à l'autre, filaient à une vitesse prodigieuse et sautillaient tels des disques ricochant sur l'eau. L'histoire suscita beaucoup de curiosité. Et fut rapidement suivie par des dizaines d'autres témoignages évoquant des « soucoupes volantes » aux propriétés insolites. Pour la presse et une grande partie de l'opinion américaines, le phénomène relevait de la crédulité populaire. Elles raillèrent les penchants irrationnels de la foule qui se passionnait pour une sorte de « Loch Ness aérien ». Mais les militaires ont pris le sujet beaucoup plus au sérieux. En ce début de guerre froide, ils craignaient que ces observations trahissent l'existence d'une nouvelle technologie ennemie. Ils redoutaient aussi que des alertes à répétition saturent les communications gouvernementales, masquant le jour venu une attaque soviétique. Certains militaires se convaincront même que les ovnis pourraient avoir une origine extraterrestre : dans des documents secrets de l'époque, l'hypothèse d'une visite interplanétaire est explicitement évoquée.



AFP

Cette image d'un objet inconnu est tirée d'une vidéo prise par un avion de l'US Navy et rendue publique par le gouvernement américain en 2020.

Tergiversant en permanence sur la façon d'appréhender le phénomène, le Pentagone lança ainsi dès 1947 une série d'enquêtes, analysant sous les noms de code « Sign », « Grudge » puis « Blue Book » 11 000 témoignages d'ovnis. Pour conclure, en 1968, sous l'autorité du physicien Edward Condon de l'université de Chicago, n'avoir découvert aucun élément enrichissant les connaissances scientifiques. L'écrasante majorité des cas s'expliquaient en effet par des illusions d'optique, les reflets d'avions et de montgolfières, de mauvaises appréciations des distances et donc des vitesses considérées. Une variété de phénomènes naturels avait par ailleurs été mal interprétée : planètes, étoiles filantes, météores, couverture nuageuse particulière, etc. Au final, 3 % des témoignages restaient inexpliqués : probablement en raison d'informations lacunaires ou de mauvaise qualité, estima le rapport Condon, qui conclua que des enquêtes plus approfondies ne sauraient « *être justifiées par l'espoir de faire progresser la science* ».

La Nasa se lance dans l'expertise scientifique des « UAP »

Tel est le sentiment qui prévaut aujourd'hui encore dans la communauté scientifique. Sans parler des scénarios invoquant une incursion extraterrestre, massivement rejetés. « *La vie, possiblement intelligente, pourrait exister dans de multiples endroits de la galaxie. Et des civilisations plus avancées que la nôtre pourraient théoriquement s'y développer,* énonce Gabriel Chardin, du Laboratoire astroparticules et cosmologie à Paris. *Mais au vu des dimensions faramineuses de la galaxie, de la durée de vie potentielle de ces civilisations, des ressources que requerraient les voyages interstellaires, et, bien sûr, des preuves avancées, l'hypothèse d'une visite extraterrestre apparaît hautement improbable pour expliquer les ovnis.* » Elle reste pourtant solidement attachée à ceux-ci : pour des raisons historiques et à cause des nombreux canulars, comme l'affaire Roswell, très médiatisée dans les années 1990. Les ovnis ont donc conservé, surtout aux États-Unis, « *une image un peu loufoque et complotiste, très stigmatisante pour les témoins de bonne foi* », note Paul Wohrer, chercheur à l'Institut français des relations internationales.

Mais un tournant va s'opérer à partir de 2017. Le *New York Times* révèle alors que le Pentagone n'a jamais vraiment cessé de s'intéresser aux ovnis, créant notamment, dix ans plus tôt, une structure secrète — le Programme d'identification des menaces aérospatiales avan-

CYRIL ENTZMANN / DIVERGENCE

« L'hypothèse d'une visite extraterrestre apparaît hautement improbable pour expliquer les ovnis »

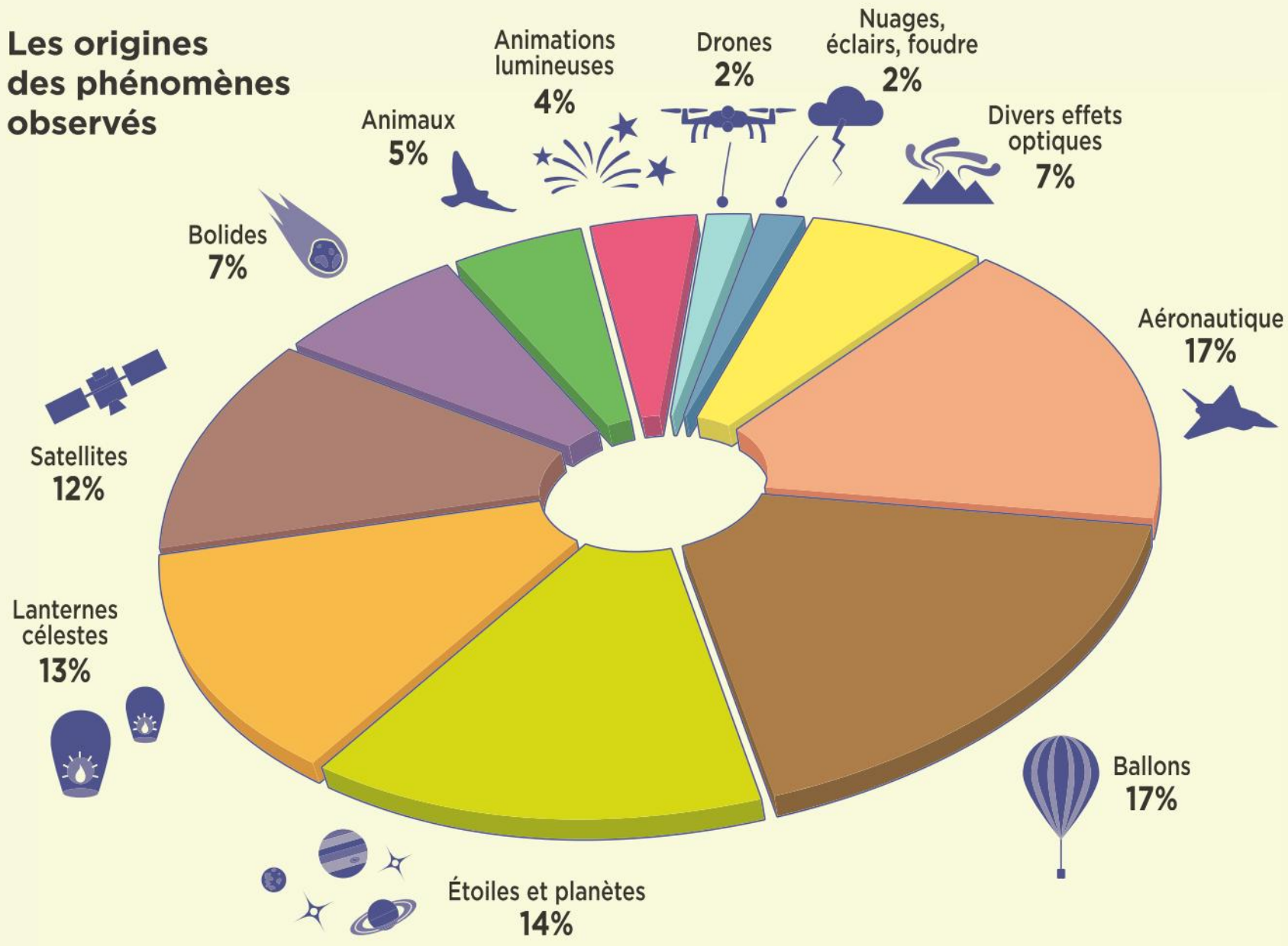
Gabriel Chardin, chercheur au Laboratoire astroparticules et cosmologie, à Paris

INVESTIGATIONS

Les méthodes des enquêteurs français

Chaque année en France, le Groupe d'études et d'informations sur les phénomènes aérospatiaux non identifiés (Geipan) reçoit environ 700 signalements. Ils reposent obligatoirement sur une observation visuelle, complétée parfois par des photographies ou vidéos authentifiées par des logiciels de traitement d'image. Dans plus de 60 % des cas, une explication est vite apportée : satellites, reflets de ballons gonflés à l'hélium, lanterne chinoise qui en s'éteignant peut être perçue comme s'échappant à une vitesse extrême, etc. Pour les autres, des investigations sont ouvertes. Le Geipan s'appuie alors sur une trentaine d'experts ainsi que sur ses partenaires institutionnels : gendarmerie nationale, armée de l'air, aviation civile, Météo France, CNRS. Des vérifications à distance s'avèrent généralement suffisantes. « *Si nécessaire, nous nous déplaçons sur le terrain,* explique Vincent Costes, responsable du Geipan. *Et réalisons ce qui s'apparente à une enquête policière, pour recouper les informations et réaliser des entretiens cognitifs avec les témoins.* » Ces entretiens permettent de comprendre la configuration d'observation et d'identifier les éléments ayant participé au sentiment de surprise et d'étrangeté, comme une faible luminosité ou l'absence de bruit. « *Il s'agira de distinguer aussi le factuel de ce qui pourrait résulter d'une croyance, d'une vive émotion ou d'une altération de la mémoire* », signale Vincent Costes. Pour les cas les plus complexes, le Geipan réunit un comité d'experts pluridisciplinaires ouvrant au maximum le champ des possibilités. Au final, seuls 3 % des signalements demeurent inexpliqués.

Les origines des phénomènes observés

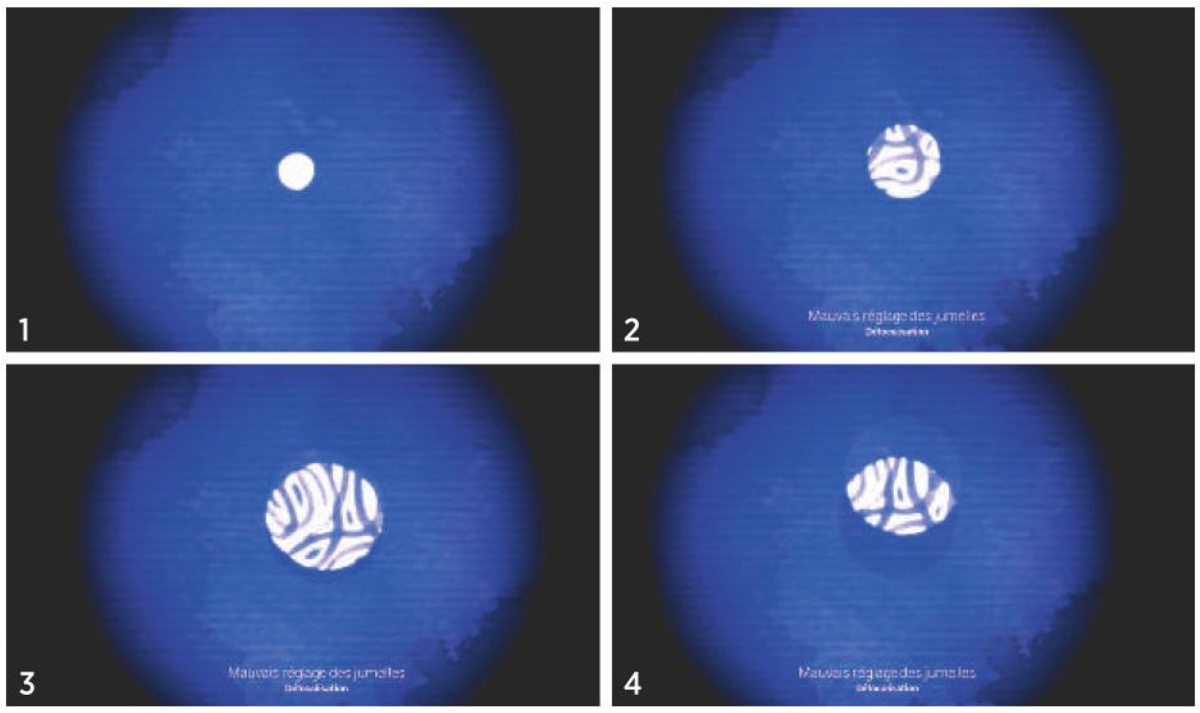


BRUNO BOURGEOIS ; SOURCE : GEIPAN

OPTIQUE

Un nouveau phénomène identifié

Même si les cas sont rares, l'étude des ovnis peut déboucher sur une découverte scientifique. C'est ce qui s'est produit en août 2020, en région parisienne, lorsqu'une personne qui scrutait Jupiter avec ses jumelles a vu apparaître des sortes de nervures mouvantes. Le Geipan a été contacté. Il a conclu, après enquête, que le témoin observa en réalité… son propre fond d'œil ! L'un des oculaires était totalement déréglé, défocalisé. Résultat : l'illumination de l'œil et l'observation de l'effet d'ombre créé par les vaisseaux sanguins de la rétine. Ces motifs se sont superposés sur le disque jovien, produisant ainsi d'étranges rayures. Qualifié de « vision entoptique », ce phénomène n'avait été quasiment jamais décrit et expliqué dans la littérature scientifique. Il serait responsable, en France, d'une demi-douzaine de signalements d'ovnis.



GEIPAN

Un dérèglement des jumelles peut entraîner une superposition des éléments de la rétine (images 2 à 4) sur l'objet observé (captures d'une vidéo du Geipan).

cées. Divers témoignages, comme ceux des pilotes de F/A-18, sont également dévoilés. Depuis lors, le changement d'attitude est très net dans la presse et l'opinion publique américaines : l'heure n'est plus aux moqueries ! Et ces révélations vont libérer une parole qui était beaucoup plus contrôlée jusqu'ici. Le Pentagone annonce ainsi, en 2020 et cette fois publiquement, la mise en place d'un Groupe de travail sur les phénomènes aériens non identifiés. Puis, en 2022, du Bureau de résolution des anomalies dans tous les domaines, précisant que parmi les centaines de signalements récents d'UAP, entre 2 % et 5 % seraient réellement « *anormaux* ». « *Les nouvelles vagues de témoignages pourraient résulter en partie du développement accéléré des drones, qui ne sont pas toujours reconnaissables, des constellations de satellites ou de ballons-sondes* », estime Paul Wohrer. Mais il subsiste, de fait, un pourcentage de cas inexpliqués. Qui du point de vue des autorités américaines pourraient constituer « *un problème pour la sécurité nationale, la sécurité aérienne, ou provenir d'une cause à élucider* », poursuit le chercheur.

D'où la décision de faire appel à la Nasa. Grâce à elle, l'étude des UAP pourra sortir d'un contexte militaire trop strict. Et bénéficier « *de l'image très positive et des valeurs de transparence scientifique dont jouit la plus célèbre des agences spatiales* », indique Paul Wohrer, aptes à rassurer l'opinion et déstigmatiser les témoins. « *Je me réjouis de cette décision* », confie Vincent Costes, responsable du Groupe d'études et d'informations sur les phénomènes aérospatiaux non identifiés (Geipan), fondé dès 1977 en France par le Centre national d'études spatiales. La Nasa semble suivre « *une approche scientifique et pluridisciplinaire assez similaire à la nôtre,* précise-t-il, *en se concentrant sur la consistance des témoignages. Elle insiste aussi sur l'importance de la qualité des données, indispensable pour des interprétations pertinentes* » *(lire l'encadré p. 29).*

Un bataillon d'instruments pour analyser les données

Selon le panel d'experts réuni par la Nasa, l'analyse des données d'UAP est en effet entravée par « *une mauvaise calibration des capteurs, le manque de mesures multiples, de métadonnées des capteurs et le manque d'informations de base* », sur les conditions atmosphériques par exemple. Il préconise ainsi que la Nasa mobilise son bataillon de télescopes et de satellites pour glaner un maximum d'informations coïncidant avec les observations d'UAP. « *On ne pourra jamais tirer grand-chose d'une image de mauvaise qualité* », insiste Gabriel Chardin. Or, depuis le sol, grâce à l'observatoire Vera-Rubin qui sera opérationnel fin 2024, la Nasa disposera de caméras d'une résolution de 3,2 milliards de pixels. Et depuis l'espace, elle résout des objets d'une dizaine de centimètres, voire d'une fraction de millimètre avec des mesures interférométriques. « *Tous ces instruments permettront de caractériser beaucoup plus précisément les signalements d'UAP. Mais aussi de les cataloguer* », pose Gabriel Chardin. Or si les cas irrésolus correspondent à ceux où les mesures physiques sont les plus lacunaires, la Nasa tiendra alors une explication convaincante pour ce type de phénomènes. ■

CapaPictures / Europe 1

Écoutez

EUROPE 1 MATIN ET *LEVEZ-VOUS DU BON PIED*

7H - 9H

DIMITRI PAVLENKO
SONIA MABROUK
GASPARD PROUST

Europe 1

La révolution quantique s'attaque aux batteries

Des batteries utilisant certaines propriétés de la physique quantique se rechargeraient en théorie quasi instantanément. Apparu il y a seulement quelques années, ce concept étonnant fait son chemin dans des laboratoires du monde entier et débouche sur des expériences prometteuses.

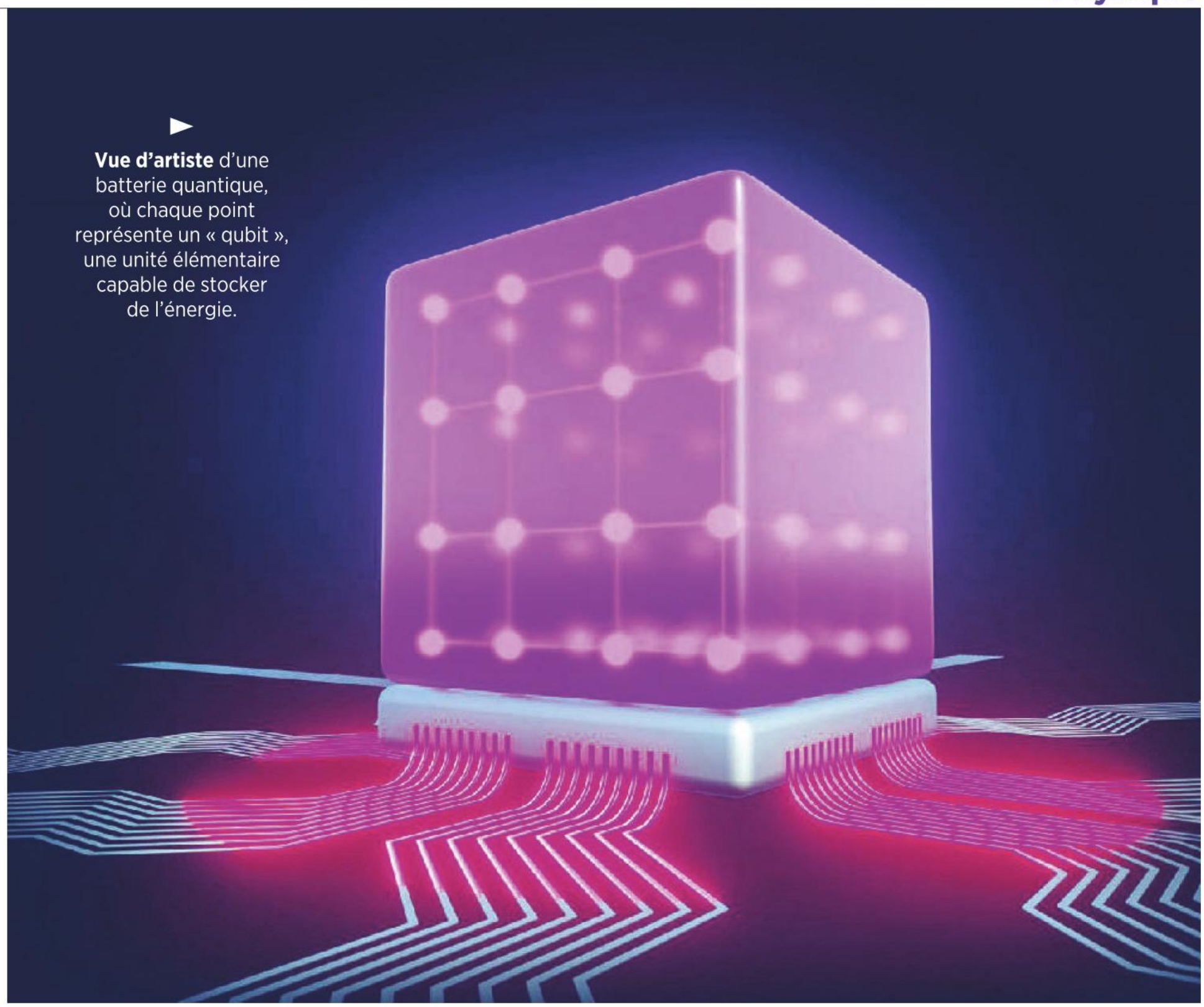
Après l'ordinateur quantique, les capteurs, la cryptographie, les batteries pourraient bien constituer une nouvelle dimension de la révolution quantique. Le concept est encore balbutiant, mais plusieurs laboratoires, en Australie, en Corée du Sud, en Italie, s'y intéressent. Ils partent du constat que les performances des batteries classiques, électrochimiques, sont condamnées à plafonner. Cette technologie vieille de deux siècles repose sur le transfert d'ions et d'électrons entre deux électrodes, à l'aide de réactions chimiques. La vitesse de charge dépend de la cinétique des réactions et du déplacement des ions dans l'électrolyte, autant de facteurs limitants qu'il est possible d'optimiser, mais pas indéfiniment. Il y aura toujours un temps de charge incompressible.

La batterie quantique fait table rase de tout cela : plus d'ions, plus d'électrons, plus d'électrolyte. On n'y trouve que des particules capables d'absorber de l'énergie fournie sous la forme de photons, pour la restituer ensuite.

Le concept a émergé en avril 2013 dans la revue *Physical Review E*, sous la plume des physiciens Robert Alicki de l'université de Gdansk (Pologne) et Mark Fannes de l'Université catholique de Louvain (Belgique). Ils rédigent alors un article traitant de la thermodynamique, cette branche de la physique qui décrit les transferts d'énergies, appliquée à la physique quantique. Tout un programme ! Car la thermodynamique considère les atomes et molécules comme un tout, en « moyenne ». Ainsi, elle peut décrire le comportement d'un gaz sans rien dire du destin d'une seule molécule de ce gaz. L'idée des chercheurs est de voir comment elle se transpose à la physique quantique qui, elle, s'applique aux particules individuelles. *« J'ai écrit pour la première fois sur la thermodynamique des systèmes quantiques microscopiques en 1979,* se souvient Robert Alicki. *Mais ce thème s'est popularisé à mesure que le contrôle des systèmes microscopiques est devenu réalité, et que diverses applications de la technologie quantique, tels les ordinateurs quantiques et les moteurs quantiques, ont été étudiées à la fois théoriquement et expérimentalement. Dans notre article de 2013, nous avons démontré que si l'on veut extraire du travail à partir d'un ensemble d'atomes, il est plus efficace d'agir sur tous les atomes en même temps que sur chaque atome séparément. Il était plutôt abstrait, de l'ordre de la physique mathématique. Mais il a attiré l'attention de la communauté et est cité comme pionnier.* »

Plus il y a de particules, plus la batterie se charge vite

L'article est fondamental pour cette découverte : l'importance du collectif sur l'individuel sitôt que l'on tente de faire de la thermodynamique avec la physique quantique. En 2018, le physi-



Vue d'artiste d'une batterie quantique, où chaque point représente un « qubit », une unité élémentaire capable de stocker de l'énergie.

PLANCKIAN

cien italien Marco Polini (aujourd'hui à l'université de Pise) et son équipe transposent les concepts abstraits de Robert Alicki aux batteries dans un article paru dans *Physical Review Letters*. C'est le véritable acte de naissance des batteries quantiques.

Marco Polini y propose notamment d'utiliser la « super-radiance », théorisée par le physicien américain Robert Dicke en 1954, comme effet collectif. Elle est étudiée, ainsi que son effet contraire, la super-absorption, par Carlo Sirtori, professeur au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Paris. *« Imaginez une particule comme un électron, capable d'absorber un photon en un temps t. Si vous fabriquez un dispositif positif contenant N électrons, le temps d'absorption du dispositif est divisé par N. C'est la super-absorption. »* Le plus étonnant, c'est que le système de N électrons se comporte comme si un seul d'entre eux était capable d'« avaler » le photon en un temps t/N. *« Cela vient de la physique quantique, qui est en quelque sorte une démocratie exemplaire,* s'amuse Carlo Sirtori. *Tous les électrons sont parfaitement identiques, et vous ne pouvez pas en distinguer un parmi les autres. Donc, si vous voulez en exciter un seul, comme vous ne pouvez pas savoir lequel, il sera excité avec une probabilité N fois plus importante. C'est ce qui fait que l'ensemble répond avec une plus grande rapidité. »* On notera au passage que plus il y a de particules, donc

C. SIRTORI

« Si vous fabriquez un dispositif contenant N électrons, le temps d'absorption du dispositif est divisé par N. C'est la super-absorption »

Carlo Sirtori, professeur au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Paris

E. CAMERINI FOR BNKR

3 QUESTIONS À

MARCO POLINI

DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ET COFONDATEUR DE PLANCKIAN*

« L'architecture de notre batterie ressemblera à celle d'un ordinateur quantique »

À quoi ressemblera votre batterie quantique ?
L'architecture ressemblera à celle d'un ordinateur quantique. C'est un ensemble de qubits à deux niveaux d'énergie enfermés dans une cavité. Nous pouvons utiliser tout type de qubits : les atomes froids, les atomes de Rydberg… Mais puisque nous venons de la physique des matériaux, nous, fondateurs de Planckian [avec Vittorio Giovannetti, Michele Dallari], sommes plus à l'aise avec les qubits du type « circuits supraconducteurs », comme ceux d'IBM ou de Google.

Justement, IBM a annoncé le 4 décembre 2023 la mise au point d'un microprocesseur de 1121 qubits. Qu'attendez-vous pour en faire une batterie ?
Si l'architecture se ressemble, la problématique est différente. Pour faire du calcul quantique et réaliser des opérations logiques, il faut contrôler parfaitement chaque qubit. Une batterie réclame de maîtriser l'ensemble des qubits en même temps afin d'obtenir l'effet de super-absorption ou de super-radiance. Si vous imaginez les qubits comme des pendules, nous devons être certains qu'ils sont tous parfaitement synchronisés.

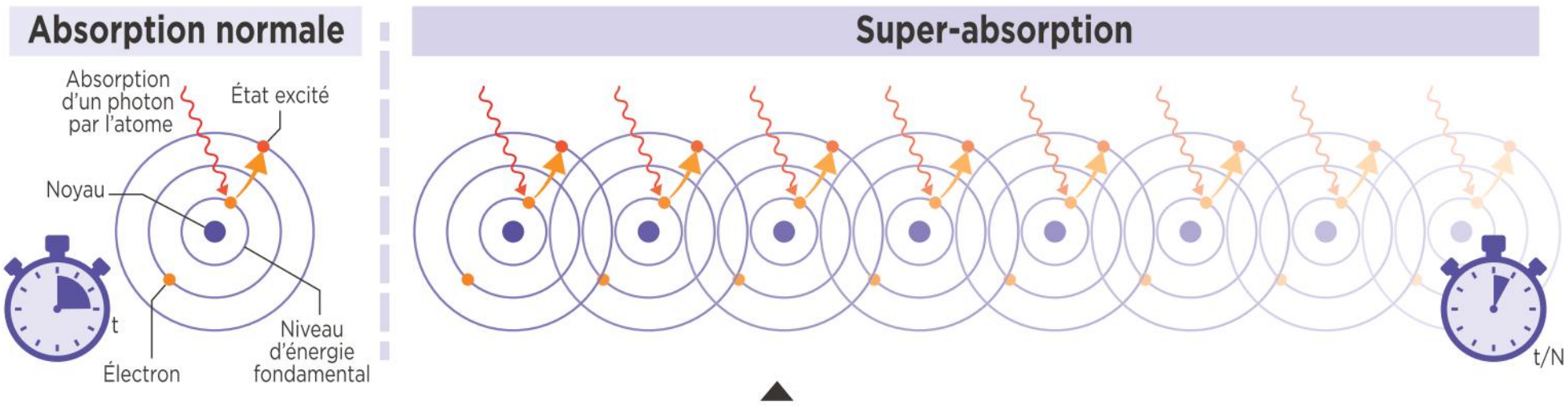
Êtes-vous optimiste quant à la mise au point rapide de batteries quantiques ?
Notre objectif à court terme est de parvenir à la preuve de concept du contrôle simultané de quelques qubits. Ensuite, nous combinerons ce volet purement quantique avec le volet énergétique afin de convertir l'énergie des qubits en électricité. Cela nous prendra sans doute quelques années, car notre projet est davantage de l'ordre de la recherche que de l'industrie. Nous sommes en pleine phase exploratoire !

Propos recueillis par F. N.

* Issue d'une collaboration entre l'université et l'École normale supérieure de Pise, la start-up italienne a récolté 2,7 millions d'euros en 2023 afin de développer des batteries quantiques.

plus la batterie est importante, et plus elle se recharge rapidement, contrairement à son homologue classique.
Le concept de batterie quantique débouche d'ores et déjà sur *« des tentatives expérimentales intéressantes »*, observe Robert Alicki. Le physicien polonais songe notamment aux travaux de James Quach et ses collègues de l'université d'Adélaïde (Australie), en collaboration avec l'Institut polytechnique de Milan (Italie). Ils ont été publiés dans la revue *Science Advanced* en janvier 2022. Il s'agit d'un dispositif se composant de molécules toutes identiques d'un colorant organique semi-conducteur, le Lumogen F Orange. Lorsqu'elles sont exposées à une lumière d'une longueur d'onde précise, les molécules passent d'un état de basse énergie à un état excité de haute énergie. Ce qui correspond à une charge, si l'on envisage cela comme une batterie. *« Le nombre de molécules impliquées dans notre dispositif est de 10^{21},* explique James Quach. *Nous avons vérifié que la vitesse d'absorption des photons par l'ensemble des molécules est très supérieure à la vitesse d'absorption d'une seule molécule, uniquement en jouant sur l'effet de super-absorption.* » Il faudra toutefois multiplier par au moins un milliard le nombre de molécules pour obtenir une puissance intéressante.
Pour y parvenir, il est impératif de minimiser la décohérence, c'est-à-dire d'isoler autant que possible les molécules de leur environnement afin qu'elles conservent leurs propriétés quantiques. *« C'est la principale difficulté de notre expérience, sur laquelle nous travaillons actuellement »*, confie James Quach. Mais ce n'est pas la seule. Bien que le dispositif absorbe effectivement la lumière, il ne la stocke pas : elle est réémise tout aussi rapidement par superradiance. L'équipe cherche donc un moyen de contrôler cette libération

Quand la physique quantique joue collectif



Lorsqu'un atome absorbe un photon, il se trouve dans un état excité. Cela se traduit par un électron qui change de niveau d'énergie en un temps t (absorption normale). Avec N atomes, ce changement se fait en un temps t/N (super-absorption).

d'énergie. Enfin, une autre difficulté est soulignée par Robert Alicki. *« L'effet de super-absorption ou de super-radiance ne s'observe que sur des dispositifs de petites tailles, comparables à la longueur d'onde du photon absorbé. En pratique, cela limite la dimension des batteries quantiques qui ne pourront équiper que des dispositifs électroniques miniaturisés, tels que des capteurs ou des nanorobots. »*

Des prototypes de batteries espérés d'ici à cinq ans

Effectivement, il n'est pas question pour l'instant de fabriquer des batteries de voiture par exemple. Néanmoins, James Quach et son équipe sont un peu plus optimistes que Robert Alicki. Ils misent sur un prototype capable d'alimenter des objets connectés : des montres, des téléphones portables. Le fait d'utiliser des photons pourrait aussi les amener à coupler ces batteries à des panneaux solaires pour en améliorer considérablement l'efficacité.

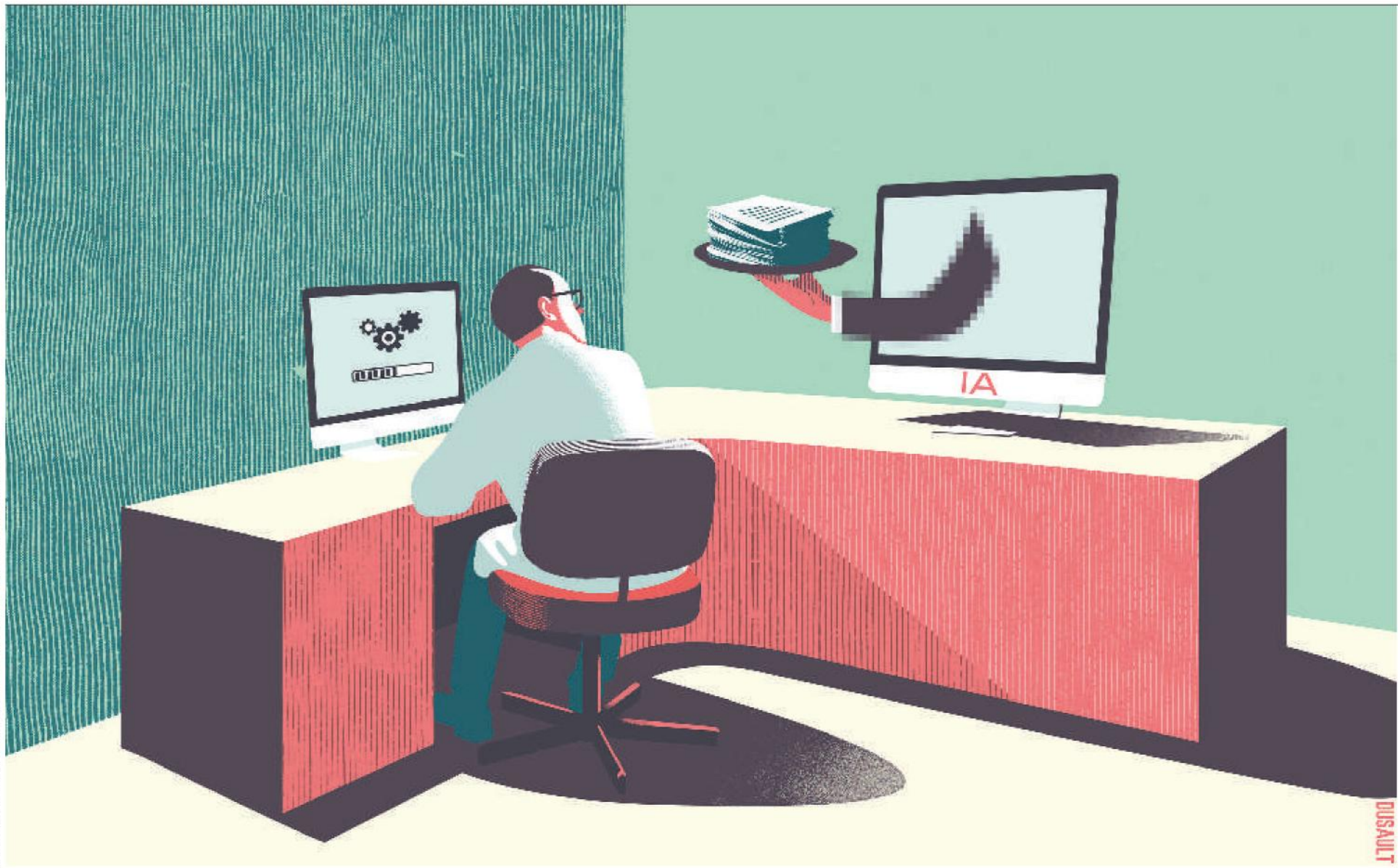
Pour le physicien Carlo Sirtori, la recherche autour de ce thème est de toute façon une bonne nouvelle. *« Je suis heureux de voir émerger d'autres applications que l'ordinateur quantique. Il est très intéressant, mais les batteries concernent le stockage de l'énergie, un enjeu majeur de la transition énergétique. Cela peut susciter l'enthousiasme des financiers et des responsables politiques. C'est une très bonne chose pour tout le secteur des applications de la physique quantique. »*

MATT TURNER/AAP IMAGE

James Quach, de l'université d'Adélaïde (Australie), teste l'absorption de lumière par des molécules.

Sans compter que la recherche en vogue sur l'ordinateur quantique devrait bénéficier aux batteries. En effet, l'informatique quantique repose sur les qubits, des dispositifs pouvant se trouver sous deux états différents, « 1 » ou/et « 0 ». Ces états peuvent correspondre à deux niveaux d'énergie différents. C'est le cas des ions piégés ou bien des circuits supraconducteurs qui miment un atome, la voie suivie par IBM et Google par exemple. Un assemblage de ces qubits constitue *de facto* une batterie qui est chargée lorsque tous les qubits sont à l'état « 1 » et déchargée à l'état « 0 ». En avril 2022, une étude réalisée par des chercheurs d'IBM et parue dans la revue *Batteries* a ainsi évalué l'efficacité d'un qubit en matière de stockage d'énergie et de temps de charge. Les auteurs ont montré qu'il est possible d'obtenir un excellent stockage d'énergie (supérieur à 95 %) dans un délai remarquablement court (moins de 135 nanosecondes). Mieux encore, ils ont constaté que les erreurs d'initialisation des qubits, qui diminuent les performances des ordinateurs quantiques, constituent au contraire un facteur améliorant encore la performance des batteries quantiques. Encourageant. James Quach, tout en reconnaissant que cette technologie est encore *« dans l'enfance »*, espère obtenir des prototypes de batteries d'ici à cinq ans. Une échelle de temps du même ordre que la start-up italienne Planckian lancée en 2023, également pour mettre au point des prototypes de batteries *(lire l'interview ci-contre)*. Et s'il n'est pas encore envisageable de doter à moyen terme les véhicules de batteries quantiques, au moins existe-t-il désormais un espoir de remiser un jour les batteries électrochimiques au musée. ■ **Fabrice Nicot**

BRUNO BOURGEOIS



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

DUSAULT

Un assistant ambigu pour les scientifiques

L'intelligence artificielle générative devient un véritable outil de travail pour chercher des publications et pour en écrire. Mais les vérifications et corrections humaines restent indispensables afin de supprimer les fausses informations.

Une heure contre dix. C'est la différence mesurée par une équipe de l'hôpital d'Antibes-Juan-Les-Pins et du CHU de Nice entre le temps passé à chercher des articles scientifiques sur un thème donné avec des outils d'intelligence artificielle et celui passé avec une prospection standard sur une plateforme en ligne. Cette évaluation, publiée en septembre 2023, portait sur l'usage de l'application mobile Juisci, qui automatise la veille en matière de littérature sur 40 spécialités médicales à partir d'algorithmes d'analyse du langage naturel. Si, dans le test, l'application a identifié 45 articles contre 184 avec une recherche standard, 48,6 % correspondaient vraiment à ce que voulaient les membres de l'équipe, contre 16,9 % avec une approche traditionnelle.

« *Les publications sont agrégées à travers des milliers de sources, puis sélectionnées et filtrées selon divers critères : révision par les pairs, facteur d'impact, nombre de citations reçues* », explique Robin Roumengas, fondateur de Juisci. Ce n'est pas tout : l'application peut aussi résumer automatiquement une publication, en en respectant la structure (contexte, méthode, résultats, conclusion), avec un lien vers le contenu originel et une validation humaine. Signe des temps, la prochaine version de l'application intégrera des modèles de langage avec un mécanisme à la ChatGPT pour fournir des méta-analyses à la demande à partir

180
pages
générées en une journée avec GPT-3.5 pour un ouvrage publié par Springer Nature.

ALEX SALIM

> “Un outil permettant de produire plus vite des articles et des ouvrages sera surtout profitable à la maison d'édition”
>
> **Guillaume Cabanac,** professeur d'informatique à l'université Toulouse III-Paul-Sabatier

de prompts (requêtes). *« On a tous passé trop de temps sur des plateformes comme PubMed à chercher des contenus. L'objectif est de consacrer ce temps à les assimiler »*, commente Robin Roumengas.

De fait, l'intelligence artificielle générative est en train de devenir un véritable outil de travail pour les scientifiques, et pas seulement pour rechercher des publications. Pour en écrire aussi! Une expérience menée au Technion, l'Institut de technologie d'Israël, a abouti à la publication fin juin 2023 d'un article sur le diabète écrit par ChatGPT. Les chercheurs ont fourni à l'agent conversationnel d'OpenAI des informations de santé et d'hygiène de vie issues des Centres pour le contrôle et la prévention des maladies, aux États-Unis, et lui ont demandé de créer un programme pour les analyser. Il a fallu plusieurs itérations et des interventions des chercheurs, mais le chatbot a pu décrire les résultats et sa méthodologie, rédiger une conclusion, une introduction et l'habituel résumé en tête d'article.

Mais il est possible d'aller plus loin. En 2019, déjà, l'éditeur germano-britannique Springer Nature publiait un livre entier sur les batteries lithium-ion écrit par un algorithme à partir du résumé de 150 articles sur le sujet. En mars 2023, l'éditeur a renchéri avec le modèle de langage GPT-3.5. Plus question de résumer: en une journée, l'IA a généré un premier manuscrit en finance et audit à partir de prompts. *« Au bout de deux heures, la première version du premier chapitre a été jugée satisfaisante et pour la suite du livre, nous avons pu aller plus vite. À la fin de la journée, nous avions 180 pages »*, indiquent des porte-parole de Springer Nature à *Sciences et Avenir*. La suite a été écrite plus classiquement, mais tout a été terminé en cinq mois, soit la moitié du temps habituellement nécessaire. Depuis octobre 2023, l'éditeur propose aussi un « assistant d'écriture scientifique », Curie, aux auteurs dont l'anglais n'est pas la langue maternelle. *« Le caractère philanthropique est discutable,* note Guillaume Cabanac, professeur d'informatique à l'université Toulouse III-Paul-Sabatier. *Un outil permettant de produire plus aisément et plus vite des articles et ouvrages sera surtout profitable à la maison d'édition.* » Au risque d'encourager la course à la publication si souvent décriée.

POUR EN SAVOIR PLUS

L'usage des outils d'IA encadrés par l'éditeur scientifique Elsevier : **sciav.fr/924elsevier**

Gare à la production de contre-vérités !

Quoi qu'il en soit, vérifications et corrections humaines restent indispensables. Car les IA génératives souffrent d'un mal bien connu : les « hallucinations ». Autrement dit, la production de contre-vérités, voire de contenus inventés. Expert dans la traque de la fraude scientifique, Guillaume Cabanac en fait le constat: *« ChatGPT entre dans une longue tradition d'outils aidant à éliminer les fautes, améliorer l'expression, chercher des formulations plus claires, et c'est une bonne chose. La différence, c'est qu'il peut être utilisé pour générer un contenu qui n'est pas issu des résultats obtenus par le chercheur, mais de l'entraînement de l'algorithme.* » Dans leurs règles éthiques, des éditeurs (Elsevier, Wiley), autorisent l'usage de l'IA générative par les auteurs mais à condition que ces derniers le déclarent. ■

Arnaud Devillard avec Nicolas Gutierrez C.

LE MOT DU MOIS

Hallucination

L'arrivée de ChatGPT à l'automne 2022, puis d'autres interfaces similaires, s'est vite accompagnée du constat que ces outils répondaient parfois… n'importe quoi. Mais toujours dans une langue impeccable. C'est ce que l'on appelle des « hallucinations ». Plus prosaïquement : des erreurs ou des inventions factuelles générées par un agent conversationnel, mais présentées comme des vérités établies. Le phénomène ne relève pas d'une intention de tromper. Il est dû au fonctionnement statistique de ces IA, aux biais présents dans les données d'entraînement et à leur absence totale de compréhension du sens des mots. Le terme prête cependant à confusion. Il tend à anthropomorphiser la machine, la fait paraître comme affectée d'un problème sensoriel ! Alors que le problème est consubstantiel à la technologie.

TIMOTHY A. CLARY / AFP

Propulsée par 33 moteurs, la fusée Starship de SpaceX, la plus puissante jamais construite, a décollé pour son deuxième essai, à Boca Chica (États-Unis) le 18 novembre 2023. Son étage supérieur a réussi à atteindre l'espace avant d'exploser.

Climat

Le délicat bilan carbone de l'industrie spatiale

Les projets pharaoniques de mégaconstellations de satellites et l'essor du tourisme spatial posent la question de l'empreinte carbone de cette industrie très gourmande en carburant et qui génère de nombreux déchets. Est-il possible de concilier activités spatiales et préservation de la planète ? Enquête.

Par Fanny Costes

Samedi 18 novembre 2023. La plus grande fusée jamais construite, Starship de SpaceX, un engin de 120 mètres de long et d'une masse de 5000 tonnes, est propulsée vers l'espace. L'image fera date, même si la mission se soldera par un échec quelques minutes plus tard. Car Starship incarne le retour de l'humain sur la Lune et peut-être un jour son premier pied sur Mars. 33 moteurs brûlant 1200 tonnes de méthane liquide si l'on en croit Elon Musk, le P-DG de l'entreprise américaine. À quelques semaines de la COP28, l'exploit technologique et le rêve de conquête spatiale sont-ils compatibles avec la brûlante question de la sortie des énergies fossiles ?

Selon une étude publiée en 2022 par des chercheurs écossais, les émissions de l'industrie spatiale mondiale sont estimées autour de 6 millions de tonnes d'équivalent CO_2 ($teqCO_2$) par an. Si l'on compare ce chiffre à l'impact estimé de l'aviation — entre 1,5 milliard et 3 milliards de $teqCO_2$ —, l'empreinte environnementale du spatial apparaît comme très faible. Mais cette évaluation n'est sans doute qu'une partie infirme de l'impact du spatial.

La vérité est que les données sont rares, car très peu de travaux sur cette question ont été conduits à ce jour. ArianeGroup est l'une des seules sociétés à s'être penchées sur l'analyse de cycle de vie de l'exploitation d'Ariane 6. Conclusion : un chiffre théorique de 20 000 $teqCO_2$ émises, soit les émissions ▸

SPACEX / AFP

annuelles de 2000 Français. Et, première surprise : la combustion des propergols solides ne compterait que pour 1 % du total ! Mais alors, où est l'empreinte carbone de la fusée ? Pour 46 %, elle résiderait dans la production et le ravitaillement des propergols au centre spatial guyanais. Deuxième poste, pour 30 %, les autres activités au sol (électricité, notamment pour la climatisation) et pendant le vol. Enfin, 21 % sont dus à la fabrication et à l'assemblage des structures en Europe, plus 2 % associés aux tests et au transport. Pour les lanceurs américains, russes ou chinois, les données sont plus lacunaires, en raison d'un manque de transparence des groupes ou agences qui les développent et opèrent. Mais, selon une étude publiée par l'Agence spatiale européenne en 2022, l'ordre de grandeur est le même pour des lanceurs de cette taille, comme la Falcon 9 de SpaceX.

Une grande variété d'émissions aux effets différents

À première vue, analyser le cycle de vie d'une mission spatiale ne semble pas différent de celui d'une voiture électrique ou d'un avion : il s'agit dans tous les cas d'évaluer les impacts liés à la phase de fabrication (extraction des matières premières, transport, production, tests opérationnels), ceux liés au fonctionnement et à la fin de vie. Mais le secteur spatial présente des spécificités uniques. « *Pour aller jusque dans l'espace, une fusée va traverser toutes les couches de l'atmosphère et émettre dans chacune d'elles,* explique Loïs Miraux, chercheur indépendant spécialisé dans les impacts environnementaux du spatial. *En fin de vie, les satellites ou les étages de fusées réentrent dans l'atmosphère et émettent à nouveau des particules. C'est la seule activité anthropique à le faire, les autres, y compris l'aviation, n'émettant que dans la couche où nous vivons, la troposphère.* »

Les premiers bilans d'impact disponibles sont jugés incomplets car le lancement est toujours modélisé de manière très simpliste, ne prenant en compte que les émissions de CO_2. Pourtant, deux autres données sont essentielles. D'abord, les ergols — mélanges de carburant et de comburant — utilisés par les fusées sont très variés. Les différents étages et propulseurs des lanceurs peuvent aujourd'hui embarquer des ergols solides, qui sont des blocs de poudre obtenus chimiquement, du kérosène ou l'un de ses dérivés, du méthane, de l'oxygène ou encore de l'hydrogène. Cette hétérogénéité va donc conduire à une très grande variété d'émissions, aux effets différents.

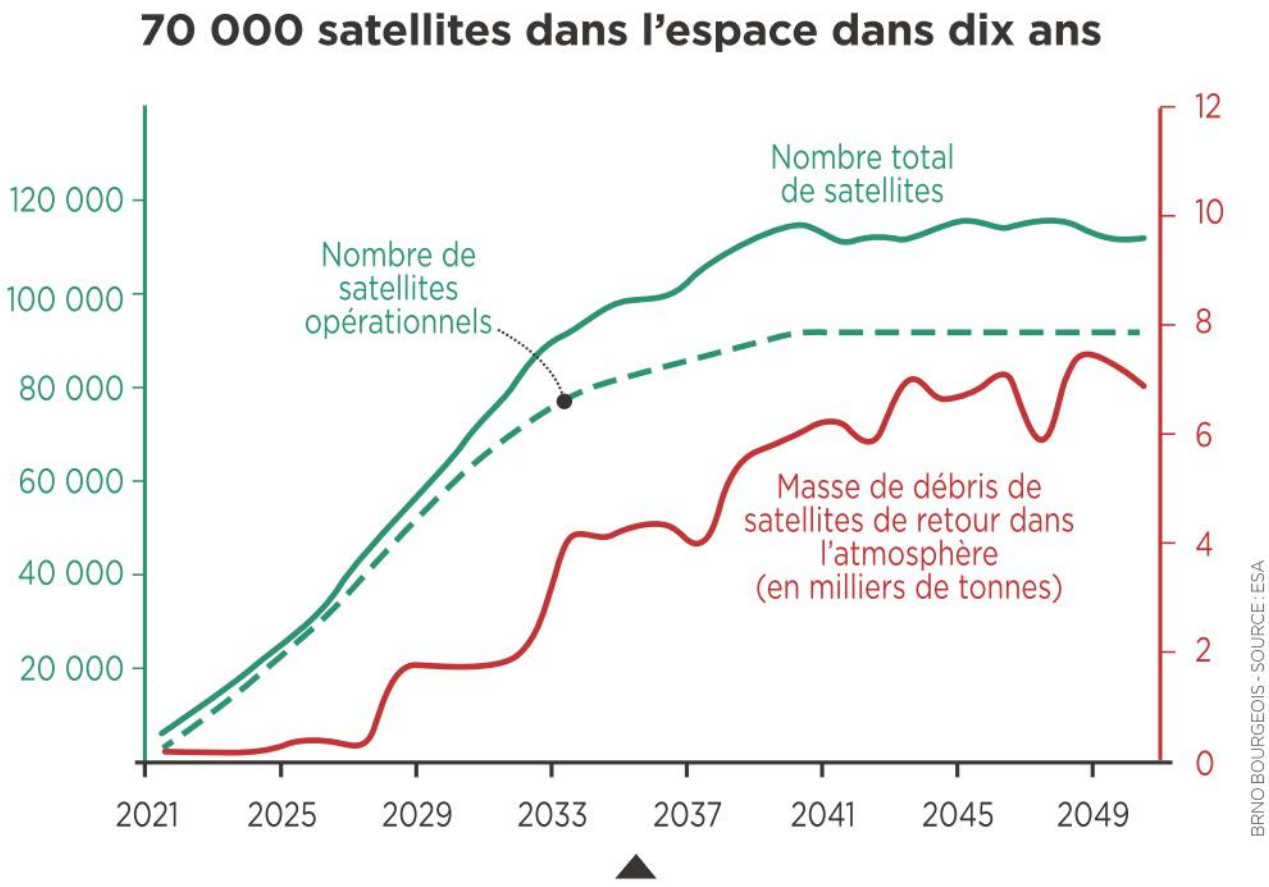
« *Ensuite, et c'est très important, l'effet d'une quantité d'émissions donnée ne va pas être le même en fonction de l'altitude à laquelle cette émission sera faite* », prévient Loïs Miraux. Pour le CO_2, rien ne change : émis à n'importe quelle altitude, c'est un gaz à effet de serre (GES) à longue durée de vie. Mais c'est très différent pour des particules comme les suies (ou noir de carbone) et celles d'alumine, des particules d'aluminium oxydées par l'air principalement émises par des fusées à propulsion solide (Ariane, Delta, Atlas…). Ces particules absorbent les rayonnements du Soleil et peuvent donc altérer l'équilibre radiatif de l'atmosphère. Dans la stratosphère, entre 12 et 50 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre, le temps de résidence des émissions sera souvent compris entre trois et cinq ans, alors qu'au sol il n'est que de quelques jours. Chaque

CLIMATOLOGIE

Les enseignements du forçage radiatif

Le forçage radiatif (en watts par m^2) mesure une perturbation de l'équilibre entre la puissance des radiations entrant dans l'atmosphère — ou une partie de l'atmosphère — et celles qui s'en échappent. La perturbation étant un phénomène extérieur au système climatique (phénomènes naturels tels que le volcanisme, ou émissions anthropiques). Un forçage radiatif positif va conduire à un surplus d'énergie dans le système considéré et donc à un réchauffement, et inversement.

Le développement du tourisme spatial va entraîner une forte augmentation des émissions de CO_2 (ici la mission Inspiration4 de SpaceX, en septembre 2021, qui aura duré trois jours en orbite à 570 km d'altitude).



Le nombre de satellites envoyés dans l'espace ne cesse de croître, avec en corrélation la multiplication des débris spatiaux.

particule émise aura donc beaucoup plus de temps pour exercer son pouvoir réchauffant dans l'atmosphère.
Les premières vont principalement être émises par des lanceurs fonctionnant à base d'hydrocarbures (Falcon 9, Long March…). « *L'absorption du flux solaire par le noir de carbone est probablement la principale source de forçage radiatif* [provoquant un réchauffement] *provenant des lancements de fusées. Et, les particules d'alumine, dont on pensait auparavant qu'elles refroidissaient la Terre en dispersant le flux solaire vers l'espace, absorbent le rayonnement terrestre à ondes longues sortant, ce qui entraîne également un réchauffement* », écrivait Martin Ross, de l'Aerospace Corporation, en 2014. Dans une publication, il évaluait ainsi le forçage radiatif *(lire l'encadré ci-contre)* des lancements de fusées à 16 mégawatts par m^2, avec des contributions relatives de 70 % pour le noir de carbone, 28 % pour l'alumine et 2 % pour la vapeur d'eau (H_2O).
Une deuxième étude publiée en 2022 par des universitaires britanniques aboutit à un impact moindre, mais elle ne prend pas en compte l'alumine, considérant les effets de ces particules comme trop incertains. Selon ses auteurs, un 1 kg de suies émis par les fusées dans la stratosphère a une efficacité de réchauffement 500 fois supérieure à 1 kg émis par le reste des activités humaines dans la troposphère.

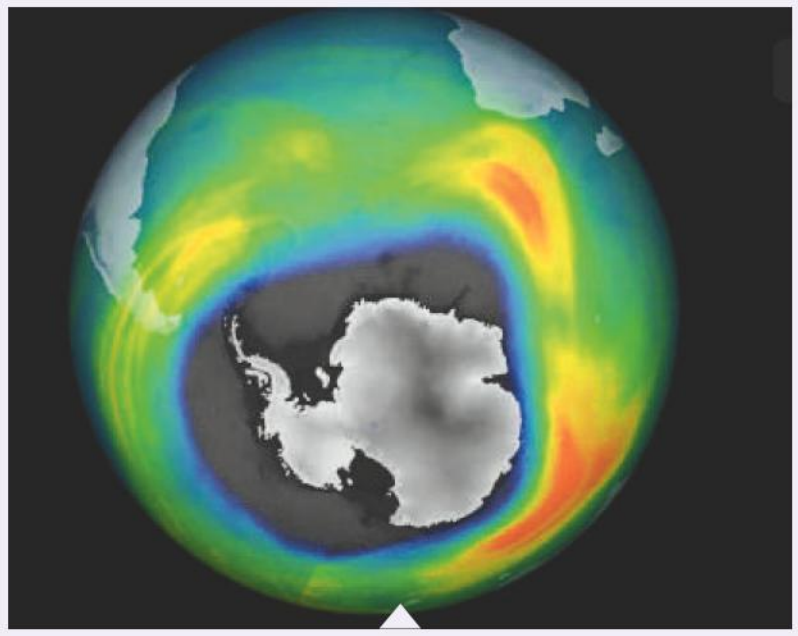
Des lanceurs propulsés au kérosène, très polluant

Un parallèle avec l'aviation (qui, elle, n'émet que dans la troposphère) est éclairant. En 2023, cette industrie a un forçage radiatif de l'ordre de 100 mégawatts par m^2. En faisant la moyenne des résultats obtenus par les deux études précédemment citées, on peut donc situer l'impact du spatial à environ 10 % de celui de l'aviation, elle-même responsable de 4 à 5 % de l'impact climatique mondial. Avec cette nouvelle évaluation, la part du spatial dans l'impact climatique global serait de 0,4 %. Reste que cette photographie omet la croissance que connaissent les activités spatiales. Les évaluations de forçage radiatif du secteur reposent sur une centaine de lancements de fusées par an. Mais depuis 2020, leur nombre augmente fortement : 114 en 2020, 146 en 2021, 186 en 2022 et la barre des 200 a été dépassée en 2023.
Sans compter les projets de mégaconstellations et de tourisme spatial. Les chiffres sont vertigineux. En 2022, SpaceX a mis en orbite basse 1722 satellites pour alimenter Starlink, dont la première génération totalisera 12 000 satellites en 2030, et la deuxième génération 30 000 en 2040. D'autres mégaconstellations sont par ailleurs en déploiement ou en projet. Citons Kuiper pour Amazon (8000 satellites en 2032), la constellation chinoise Guowang (13 000 satellites en 2034), Astra (13 620 satellites d'ici à 2032) ou encore OneWeb (6154 satellites en 2030). D'ici à dix ans, la feuille de route prévoit donc d'envoyer environ 70 000 satellites dans l'espace !
Aujourd'hui, la majorité des lancements sont effectués à partir de fusées Falcon 9 ou Long March, respectivement développées par SpaceX et la CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation), lesquelles embarquent toutes du kérosène, grand émetteur de suies dans les hautes couches de l'atmosphère. Demain, le lanceur Ariane Next et les nouvelles fusées américaines

STRATOSPHÈRE

Un impact sur la couche d'ozone ?

Depuis l'interdiction des gaz CFC (chlorofluorocarbures) à la fin des années 1980, le trou dans la couche d'ozone a commencé à se résorber. Mais l'Organisation météorologique mondiale a récemment observé un retournement de situation, en particulier au-dessus du pôle Nord. « *Le secteur spatial étant aujourd'hui le seul à opérer dans la stratosphère où se trouve la couche d'ozone, on ne voit pas quel autre acteur pourrait être responsable. À l'aune de l'intensification du lancement de satellites, c'est particulièrement inquiétant* », estime Laurence Monnoyer-Smith, directrice du développement durable au Cnes. L'Aerospace Corporation évalue l'impact sur l'ozone des lancements à hauteur de 1 % des CFC responsables du trou dans la couche d'ozone et bannis par le protocole de Montréal de 1995. Mais si on considère les 1000 lancements par an souhaités par le P-DG de SpaceX Elon Musk, même en n'utilisant que des moteurs à propergol liquide, moins émissifs de particules, la perte mondiale d'ozone due aux lancements de fusées pourrait être significative.



ESA

Le trou dans la couche d'ozone observé par le satellite Sentinel-5P le 16 septembre 2023.

(Startship Superheavy de SpaceX, New Glenn de Blue Origin…) embarquant un mélange de méthane et d'oxygène liquides seront plus performants écologiquement. Mais ils ne remplaceront que très progressivement les lanceurs existants. Et cela n'empêchera pas les émissions d'alumine ni celles des suies. À l'autre extrémité du cycle de vie spatial se trouvent les rentrées d'engins spatiaux qui, là encore, augmentent à mesure que de nouveaux satellites sont lancés. Celles-ci entraînent de nouvelles émissions ou dépôts dans la haute atmosphère. « *Nous constatons une augmentation des espèces, en particulier le lithium, le cuivre et l'aluminium, qui ne peuvent provenir que de l'industrie spatiale à des altitudes d'environ 20 kilomètres* », a déclaré Karen Rosenlof, météorologue de recherche au laboratoire de sciences chimiques de la NOAA, l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique. Pour l'heure, aucune perturbation majeure n'est observée, mais « *à mesure que les vols spatiaux augmentent, nous allons commencer à constater des impacts.* »

Parallèlement, les projets de développement de tourisme spatial sont aussi une source d'inquiétude. C'est qu'il faut compter entre 30 et 40 tonnes de CO_2 émises par passager pour un vol suborbital uniquement (à bord de Virgin Galactic par exemple), sans intégrer les émissions dans la haute atmosphère. Un chiffre qui passe à environ 650 tonnes de CO_2 par touriste pour un vol orbital qui aurait pour destination la Station spatiale internationale, par exemple. « *Un tel voyage, si on vise l'accord de Paris, qui fixe la limite acceptable d'émissions à 2 tonnes par an et par personne, équivaudrait à plus de 300 ans d'émissions d'une personne* », souligne Julien Doche, ingénieur dans le secteur spatial et membre du réseau Pour un réveil écologique.

Des initiatives et propositions de leviers d'action émergent

En avril 2022, le représentant démocrate américain Earl Blumenauer a présenté la loi fiscale sur la protection contre les émissions de carbone (Space), qui taxerait les lancements commerciaux humains n'effectuant pas de recherche scientifique. Mais ce projet n'a pas été adopté. En France, le Centre national d'études spatiales (Cnes) a lancé des travaux plus poussés sur le sujet. MaiaSpace et l'Onera ont publié récemment un appel à candidatures pour un projet de thèse visant à quantifier l'impact environnemental d'un lanceur méthane/oxygène. Et le réseau Pour un réveil écologique vient de rédiger un rapport sur l'impact environnemental du spatial. « *Nous y proposons 12 leviers d'action, parmi lesquels le besoin de réglementation internationale et la définition de potentiels quotas pour les lancements* », confient Julien Doche et Prunelle Vogler, deux des rédacteurs du rapport. L'heure du réveil écologique de l'exploration spatiale a véritablement sonné. ■

DU 13 AU 25 SEPT. 2024

IMMERSION DANS LE GRAND NORD CANADIEN

EXPÉDITION GROENLAND - TERRE DE BAFFIN LABRADOR - TERRE NEUVE

AMIS DU GRAND NORD, que les seuls noms de Groenland, Nunavut, Saint-Pierre et Miquelon fascinent, ce voyage est pour vous !

Bien sûr, il faudra vous armer de quelque patience et pratiquer un habile exercice mémotechnique pour retenir ceux de Kangerlussuaq, Qikiqtarjuak ou encore Nachvaq, escales parmi la douzaine que nous découvrirons lors des 13 jours d'expédition entre la grande île européenne et le Canada puis la France du bout du monde... Une occasion exceptionnelle de franchir le cercle Arctique, jouir de la beauté de paysages uniques, clarté des eaux, scintillement du glacier d'un fjord proche du parc national d'Auyuittuq.

Nous aurons la chance d'être en compagnie de Rémy Marion, que certains d'entre vous connaissent bien, membre de la société de Géographie, de la société des Explorateurs français, pour effectuer ce périple unique. Spécialiste des ours, auteur des « Métamorphoses de l'ours polaire » et de « Fort comme un ours », ce sera un guide naturaliste de premier ordre, décryptant aussi bien les secrets des ursidés que des glaciers, des morses ou des guillemots mais également prompt à nous rappeler l'épopée des Vikings ou les mythes des Inuits.

L'aboutissement du voyage, quatre jours entre l'Anse-aux-Meadows, Gros Morne à Terre-Neuve, et enfin Saint-Pierre et Miquelon devrait constituer une découverte exceptionnellement émouvante pour beaucoup d'entre nous.

Dr DOMINIQUE LEGLU
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

AVEC LA PARTICIPATION DE [2]
RÉMY MARION, Guide, conférencier, spécialiste des ours
ET **DOMINIQUE LEGLU**, Directrice éditoriale de Sciences et Avenir

13 JOURS / 12 NUITS À BORD DE L'EXPLORIS ONE
À PARTIR DE **8 990 €/PERS.** EN TOUT INCLUS [1]

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur **www.sa-expedition.fr**
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

[1] Voir détails sur la brochure [2] Sous réserve de disponibilité

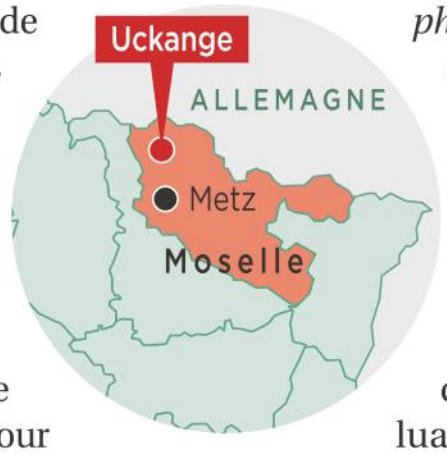
SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Concept Graph. Atelier Pascale M (26) Photos © Destination Canada - 180002_004 - Nunavut - A9116678

Quand les plantes dépolluent

Certaines espèces végétales ont la capacité de capter voire de détruire des polluants, métaux ou hydrocarbures. Reportage sur un ancien site industriel où des chercheurs étudient cet étonnant processus et tentent d'identifier les micro-organismes les plus efficaces pour dépolluer des sols souillés.

Symboles de la désindustrialisation, les tours du haut-fourneau U4 dominent de plusieurs mètres un parc de 12 hectares. À Uckange, en Moselle, cette ancienne usine sidérurgique a été réhabilitée en lieu culturel en 2007. Mais pendant plus de cent ans, de 1890 à 1991, elle a craché ses fumées dans la vallée de la Fensch. Les sols du territoire gardent la trace de cette activité industrielle : ils sont, encore aujourd'hui, imbibés de nickel, cuivre, plomb, manganèse… L'U4 compte ainsi parmi les plus de 9500 « sites et sols pollués », recensés en France par le ministère de la Transition écologique. Pour tenter de réduire ces tapis de substances polluantes, étape préalable à la plupart des projets de réhabilitation, on recourt très généralement à des excavations : la terre est alors extraite sur plusieurs mètres de profondeur pour être stockée, incinérée, ou transportée sur des sites d'enfouissement. C'est d'ailleurs cette méthode qui a été utilisée sur une partie du parc de l'U4. Mais sur d'autres parcelles, la communauté de communes de la vallée de la Fensch, propriétaire des lieux, a opté pour une autre technique, soutenue par l'université de Lorraine : une dépollution par les plantes, ou phytoremédiation. *« Nous avons voulu utiliser la contrainte de la pollution comme un atout, pour transformer ces friches en démonstrateurs scientifiques de la phytoremédiation, en créant des Jardins de la transformation »*, explique Leslie Sieja, médiatrice scientifique à l'U4.



Certaines espèces végétales ont en effet la capacité de capter voire de détruire certains polluants. Grâce à des adaptations et évolutions génétiques, elles parviennent à absorber des métaux, et à les stocker dans leur sève, leurs feuilles ou leurs tiges. Quant aux polluants organiques, comme les hydrocarbures, ils peuvent être dégradés par l'action de micro-organismes, présents de manière plus abondante au niveau du système racinaire des végétaux. *« Les plantes développent ces procédés pour survivre, ou pour se protéger de prédateurs ou de la concurrence d'autres plantes »*, explique Guillaume Echevarria, professeur à l'université de Lorraine. Avec ses collègues, il étudie ces phénomènes depuis une trentaine d'années. Au Laboratoire sols et environnement, Sonia Henry s'est également spécialisée dans ce domaine.

Des teneurs importantes en éléments traces métalliques

Dans le parc de l'U4, les deux chercheurs ont trouvé un parfait terrain d'expérimentation. Des prélèvements effectués à « T zéro » ont permis de révéler non seulement la présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polluants organiques issus majoritairement des activités de combustion, mais aussi des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) — communément appelés « métaux lourds » — supérieures aux quantités présentes naturellement dans le sol de cette zone géographique. *« La teneur de certains éléments métalliques dans les sols de l'U4 est de dix à 30 fois plus importante,* indique Sonia Henry. *C'est le cas du zinc, un oligo-élément*

INFOGRAPHIES: BRUNO BOURGEOIS

Aurélie Gueniffey, de l'association La Forêt gourmande, surveille l'évolution des différentes espèces plantées dans un des jardins-forêts sur le site de l'U4, à Uckange (Moselle).

Les 4 actions des végétaux sur les polluants

EXTRACTION

Les racines extraient les polluants et les stockent dans les tiges et les feuilles. Les plantes sont ensuite récoltées et brûlées. Certains polluants peuvent être récupérés.
Polluants concernés : métaux et radioéléments.

STABILISATION

Absorption et séquestration des polluants au niveau des racines, ce qui limite leur entrée dans les nappes phréatiques.
Polluants concernés : arsenic et radioéléments.

VOLATILISATION

Les polluants sont transformés en éléments volatils moins nocifs qui sont libérés dans l'atmosphère par transpiration des feuilles.
Polluants concernés : sélénium, mercure.

DÉGRADATION

Absorption des polluants organiques puis dégradation par des enzymes qui sont ensuite incorporés à la plante.
Polluants concernés : hydrocarbures, pesticides, explosifs.

potentiellement toxique à haute dose. » Sous les tours, plusieurs parcelles de 150 à 250 m² laissent sortir de terre ici des feuilles de miscanthus, là le tronc d'un jeune chêne, là-bas quelques vignes. « *Les expériences de phytoremédiation se concentrent généralement sur une espèce particulière,* constate Sonia Henry. *La particularité de notre projet est de regrouper différentes modalités de traitement* [voir l'infographie ci-dessus], *en associant plusieurs espèces végétales.* » Dans cette optique, l'université de Lorraine s'est associée à l'association La Forêt gourmande (FoGo), qui développe des jardins-forêts dans lesquels toutes les espèces plantées sont comestibles. L'implantation de tels jardins à l'U4 vise ainsi à tester la capacité de dépollution de nouvelles espèces. « *Nous disposons de données scientifiques sur le transfert des polluants de plantes hyperaccumulatrices de métaux* [lire l'encadré p. 46], *ou de certaines espèces potagères, mais presque aucune sur les essences des jardins-forêts* », justifie Sonia Henry. En mars 2022, une vingtaine d'espèces a ainsi été plantée par parcelle : des lamiers, de l'hibiscus, des cornouillers, des fraisiers, des grands orpins… « *Nous* ▶

PHYTOEXTRACTION

Des plantes pour recycler des métaux

Les plantes dites hyperaccumulatrices ont la capacité d'absorber, dix à 100 fois plus que leurs congénères, certains métaux dans leurs parties aériennes, généralement leurs feuilles. En récoltant et en incinérant celles-ci, il est possible d'extraire les métaux stockés. En 2016, plusieurs chercheurs de l'université de Lorraine ont créé l'entreprise Econick, spécialisée dans ce processus d'« agromine ». Cette « phytoextraction », envisageable dans tous les sols qui contiennent certains métaux, peut aussi s'avérer une méthode de dépollution d'anciens sites industriels, comme à l'U4, où Econick a implanté des spécimens. Parmi eux : l'alyssum, une plante capable d'absorber 150 kg de nickel par hectare. *« Nous testons aussi quelques plants de* Noccaea, décrit Guillaume Echevarria, cofondateur d'Econick. *Cette espèce, qui pousse dans le Grand Est et au Luxembourg, peut accumuler du nickel, du zinc, du cadmium et du plomb. C'est notre championne locale ! »* Une fois récoltées, les feuilles de ces hyperaccumulatrices sont incinérées, en prenant soin si nécessaire de filtrer les fumées. Puis c'est dans les cendres que les métaux sont récupérés et séparés, grâce à des *« solutions complexes. Ce processus est encore agressif, et nécessite beaucoup d'intrants chimiques,* prévient-il. *Mais nous recherchons d'autres procédés plus légers. »* Alors que la demande ne cesse de croître pour la fabrication des batteries, récupérer du cobalt ou du nickel est une alternative à leur importation, même si les quantités produites ne peuvent atteindre celles des sites miniers.

avons choisi de varier au maximum les ressources disponibles, en mélangeant des tubercules, des fruitiers, des légumes potagers, des arbustes… », liste Fabrice Desjours, fondateur de la FoGo. Mais le premier critère de sélection était celui de leur capacité à se développer sur des « technosols » : ce n'est en effet pas une terre fine, riche en matières organiques, qui s'étend sous le haut-fourneau ; ici, il y a des zones de remblai, des dalles de béton, des boues, entre lesquelles les racines doivent se frayer un chemin, tout en composant avec les polluants présents dans le sol. Pour évaluer leur capacité à croître dans ce milieu hostile, ces plantes sont testées en laboratoire, à l'IUT de Thionville. Dans des chambres où sont contrôlés la température, le taux d'humidité ou encore la luminosité, Sonia Henry dépose des pots témoins, qui contiennent une terre classique, ainsi que d'autres pots, remplis d'échantillons du sol de l'U4. Puis elle y plante l'espèce qu'elle souhaite tester. Objectif : évaluer l'impact des polluants sur la croissance en mesurant les racines. Ces tests d'écotoxicité donnent un aperçu de la capacité de certaines espèces à pousser même en présence d'éléments métalliques ou d'hydrocarbures. *« Nous cherchons également à repérer quels micro-organismes peuvent dégrader certains HAP »*, détaille Sonia Henry, penchée sur son microscope dans une autre pièce du laboratoire. Elle observe des micro-organismes mis en culture avec, comme seule source de carbone, des HAP : *« S'ils parviennent à se développer dans ce milieu-là, c'est qu'ils ont la capacité de découper les liaisons. L'intérêt pour nous est d'utiliser ces micro-organismes pour dégrader les molécules organiques. Le but étant d'aller jusqu'à la minéralisation, c'est-à-dire de passer d'un HAP toxique à des molécules minérales, à savoir du CO_2 et de l'eau. »* La présence de tels micro-organismes à l'U4 accroît les chances de dépollution : *« Plus les espèces végétales sont variées, plus la diversité microbienne le sera aussi, et plus il sera probable d'avoir des micro-organismes possédant les capacités enzymatiques de dégradation des molécules organiques »*, renchérit Sonia Henry, pour confirmer l'intérêt des jardins-forêts.

Des analyses pour déterminer où les polluants se sont déplacés

Mais si les espèces plantées parviennent à dégrader les hydrocarbures, ou à stocker certains métaux, les parties comestibles seront-elles contaminées ? *« La question est de savoir si l'on pourra manger les raisins des vignes, ou les glands des chênes,* estime Fabrice Desjours. *Est-ce que les polluants seront transférés dans les racines, dans les feuilles ou dans les fruits ? »* Pour tenter de répondre à ces questions, c'est une nouvelle fois en laboratoire que Sonia Henry s'affaire. Dans un tube, elle dépose quelques grammes de végétaux broyés, prélevés sur l'une des parcelles cultivées de l'U4. *« On ajoute un mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique, puis on fait monter le tout*

Ces tests d'écotoxicité donnent un aperçu de la capacité de certaines espèces à pousser même en présence d'éléments métalliques ou d'hydrocarbures

Des tests d'acidité du sol du jardin-forêt (en haut) et de croissance de plants d'avoine (au milieu) sont effectués par les chercheurs. Fabrice Desjours, de la Forêt gourmande, et Sonia Henry, de l'université de Lorraine, dosent les éléments traces métalliques dans des échantillons de végétaux prélevés sur l'une des parcelles cultivées de l'U4 (en bas).

en température », décrit-elle en plaçant ses tubes dans une sorte de four. *« Cette étape de minéralisation permet de couper toutes les liaisons entre les éléments traces métalliques dans le but de les libérer, afin de pouvoir les doser,* explique la chercheuse. *On fait ces mêmes analyses sur les racines, les tiges, les feuilles, les fruits, afin de déterminer où les polluants se sont déplacés.* »

Une nouvelle source de semences ou de biomasse

De premiers prélèvements des jardins-forêts de l'U4 ont été réalisés, mais les résultats restent à confirmer. *« Les taux de transfert apparaissent très faibles pour le moment, mais cela peut résulter du pH, plutôt basique, du sol de l'U4, qui est amené à s'acidifier du fait de la présence de végétaux,* affirme Sonia Henry. *Or, plus un sol est acide, plus les métaux seront mobiles et transférables dans la plante* ». Donc potentiellement dans ses parties comestibles. *« Même si, finalement, il n'est pas possible de manger ce qui pousse sur ce site, celui-ci pourrait devenir un lieu de semences* », avance Fabrice Desjours. Encore faudra-t-il s'assurer que ces graines ne sont pas contaminées, ou du moins ne contamineront pas leurs progénitures. Autre piste de débouchés explorée : l'exploitation de la biomasse de ces végétaux. Le miscanthus par exemple, particulièrement vigoureux en milieux pollués, peut être utilisé comme source de chauffage, de méthanisation, de matériaux de construction ou d'isolants.

Reste le problème de la lenteur du processus, mais Sonia Henry demeure optimiste : *« Quand les conditions sont réunies, en laboratoire, les taux d'abattement par phytoremédiation pour un polluant organique peuvent atteindre 80 % en quelques mois.* » Si le succès est au rendez-vous, les « Jardins de la transformation » d'Uckange pourraient devenir un modèle pour les autres sites pollués de notre territoire. ■ **Camille Jourdan**

Reportage photo : Éléonore Henry de Frahan / Collectif Argos pour Sciences et Avenir

Dépression

Les nouvelles pistes pour s'en sortir

Les antidépresseurs ne sont pas la solution unique pour traiter cette maladie qui touche un Français sur cinq. Les scientifiques parviennent à identifier des profils de dépressifs et à mettre au point des stratégies thérapeutiques plus adaptées. Mais l'amélioration de la santé mentale passe aussi par l'adoption d'un mode de vie plus sain.

Dossier réalisé par
Cécile Coumau et
Guillaume Jacquemont

RECHERCHE
Des traitements de plus en plus ciblés
p. 50

CONSEILS
5 mesures d'hygiène mentale
p. 56

ENTRETIEN
« Les psychothérapies agissent sur le cerveau »
p. 62

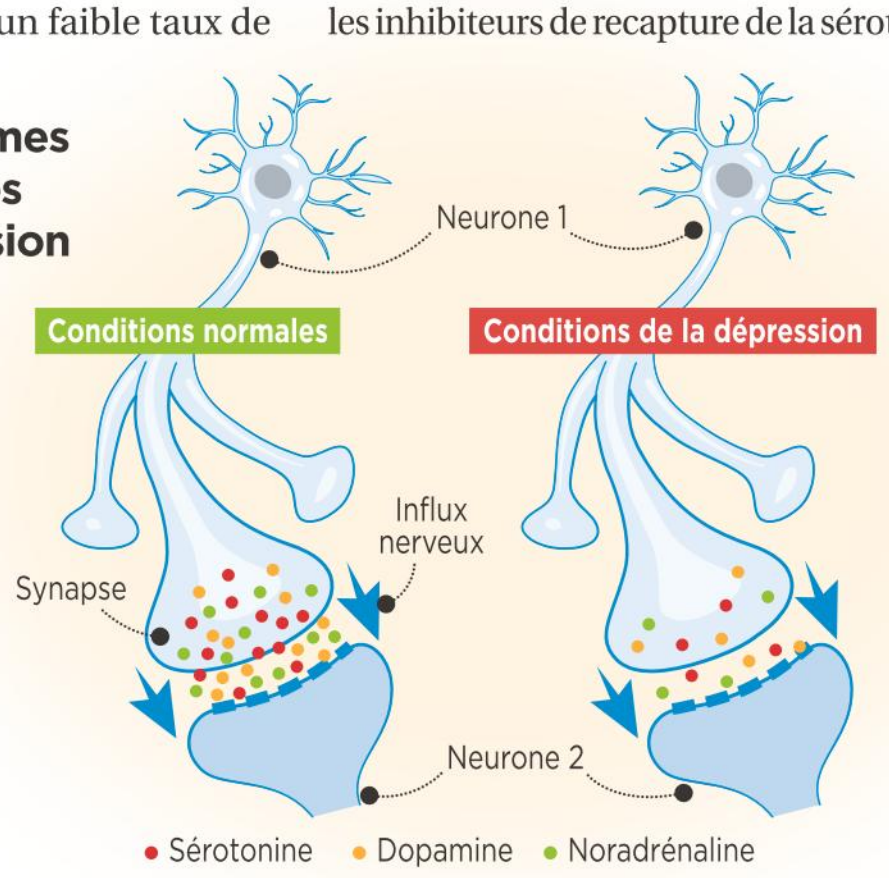
BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE

Des traitements de plus en plus ciblés

Les antidépresseurs ne peuvent pas répondre à toutes les formes de la maladie. La recherche en santé mentale se mobilise pour identifier des profils de dépressifs et mettre au point de nouvelles stratégies thérapeutiques.

Exit le terme « dépression ». *« Nous parlons aujourd'hui de troubles du spectre de l'humeur »*, déclare le Pr Marion Leboyer, psychiatre à l'université Paris-Est Créteil et directrice générale de la fondation FondaMental. Cette appellation n'est pas une coquetterie de spécialistes. La maladie, qui touche une personne sur cinq, se décline maintenant au pluriel car la recherche en santé mentale a montré qu'elle se présente sous des formes très hétérogènes. L'époque où l'on pensait traiter tous les dépressifs avec une seule classe de médicaments, les antidépresseurs, est donc révolue. À l'instar d'autres disciplines telles que la cancérologie et la cardiologie, la psychiatrie développe une médecine de précision, visant à *« mettre fin à une approche uniformisée des soins »*, indique Marion Leboyer. Cette approche est encore balbutiante. Pour preuve, le pourcentage de malades qui ne voient pas leur état s'améliorer malgré au moins deux traitements antidépresseurs successifs bien suivis, stagne autour de 20 %. *« Dans la pratique, nous avons l'impression que nous parvenons à mieux prendre en charge les personnes souffrant de dépression résistante, mais cela ne se traduit pas encore dans les études épidémiologiques »*, reconnaît le Pr Pierre-Michel Llorca, spécialiste de la dépression résistante et directeur des soins de la Fondation FondaMental. Le premier obstacle consiste sans doute à lever le mystère persistant autour de l'étiologie de la dépression. Que se passe-t-il précisément dans le cerveau d'un dépressif ? Un mécanisme biologique a bel et bien été identifié : un dysfonctionnement au niveau des neurotransmetteurs engendre un faible taux de sérotonine, très impliquée dans la régulation de l'humeur, de l'appétit, de l'alternance veille-sommeil, de la libido… Un manque de noradrénaline est lui aussi en partie responsable d'une dépression. Quand cet autre neurotransmetteur, qui participe à la régulation des émotions, vient à manquer, les émotions négatives dominent. Fort de ces constats, une classe d'antidépresseurs, les inhibiteurs de la recapture de la sérotonine (ISRS), suivie dans les années 1990 par les inhibiteurs de recapture de la séroto-

Les mécanismes biologiques de la dépression



Une baisse de la production de trois neurotransmetteurs majeurs (sérotonine, dopamine, noradrénaline) est à l'origine d'un épisode dépressif.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : INSTITUT DU CERVEAU

TRISTAN REYNAUD

Un médicament à base de kétamine est administré par intraveineuse à une patiente sous surveillance médicale à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Ce psychédélique fait partie du nouvel arsenal thérapeutique développé contre la dépression.

nine et de la noradrénaline (ISRN), caracolent en tête des médicaments les plus prescrits dans le cadre de la dépression. Mais tout mettre sur le dos des monoamines — et plus particulièrement de la sérotonine — serait trop simple pour un cerveau humain ! En août 2022, une étude publiée par des chercheurs britanniques dans la revue *Molecular Psychiatry* a d'ailleurs fait grand bruit. Après avoir compilé plusieurs méta-analyses, leurs auteurs concluaient qu'il n'existait « *aucune preuve cohérente de l'existence d'un lien entre la sérotonine et la dépression* » et « *l'hypothèse selon laquelle la dépression est causée par une baisse de l'activité ou des concentrations de sérotonine* » ne tenait pas. L'utilisation à long terme d'antidépresseurs pourrait même réduire la concentration de sérotonine. Aurions-nous tout faux dans la dépression depuis des années ? La réaction de la communauté scientifique ne s'est pas fait attendre. Au-delà des critiques sur la méthodologie de l'étude, des voix se sont élevées pour dénoncer des conclusions aussi radicales. « *Aucun spécialiste de santé mentale n'irait actuellement soutenir l'idée qu'une pathologie aussi complexe que la dépression s'explique par le déficit d'un seul neurotransmetteur* », a alors tempéré le psychiatre britannique Phil Cowen, dans une réaction au Science Media Center. En outre, « *le système sérotoninergique est très dispersé,* indique Pierre-Michel Llorca. *Agir dessus s'avère donc particulièrement complexe.* »

20 %
des malades ne voient pas leur état s'améliorer malgré au moins deux traitements antidépresseurs successifs bien suivis.

En revanche, cette étude prouve une nouvelle fois que les ISRN ne peuvent être l'alpha et l'oméga du traitement de la dépression. D'autant que d'autres neurotransmetteurs, l'acide gamma-aminobutyrique (Gaba) et le glutamate, figurent aussi sur le banc des accusés. C'est pourquoi est arrivé en 2020 un nouvel antidépresseur à base d'eskétamine, le Spravato, indiqué dans la dépression résistante. Non seulement c'est le tout premier à agir sur les récepteurs du glutamate, mais son mode d'administration sous forme de spray nasal le rend aussi efficace très rapidement. « *Au lieu d'un délai de cinq semaines avec les antidépresseurs traditionnels, l'eskétamine agit dans les 24 heures En cas d'idées suicidaires, l'eskétamine représente un vrai progrès* », estime le Dr Charles Laïdi, psychiatre à l'hôpital Henri-Mondor (Créteil). En raison de son statut de stupéfiant, le Spravato ne peut être délivré qu'à l'hôpital et sous surveillance. La revue *Prescrire* le classe même dans ▶

les « *médicaments à éviter* » en raison notamment de « *ses effets indésirables neuropsychiques fréquents, dont les syndromes de dissociation* », ainsi qu'un « *surcroît de risque suicidaire dans les semaines qui suivent le traitement et des détournements d'usage* ».
Néanmoins, l'eskétamine n'est pas le seul psychédélique à faire son entrée dans l'arsenal thérapeutique des troubles du spectre de l'humeur. Ils font même un retour en force ! Un retour car dans les années 1950, le LSD, un dérivé d'un champignon parasite du seigle, ainsi que la psilocybine, la substance psychoactive des champignons hallucinogènes, faisaient déjà l'objet de nombreuses recherches, suscitant de grands espoirs dans le traitement de la dépression mais aussi de l'anxiété, ou encore des troubles obsessionnels compulsifs. Mais, à partir du milieu des années 1960, ces substances vont peu à peu être interdites et classées comme psychotropes, à cause de leurs propriétés hallucinatoires.

La psilocybine autorisée aux États-Unis depuis 2020

Ce classement signe la fin de toutes les recherches pendant plus de trente ans. Il faudra en effet attendre le milieu des années 1990 pour que des chercheurs se penchent à nouveau sur les psychédéliques. Si le vent a tourné, ce n'est pas parce que ces drogues ont perdu leur pouvoir hallucinogène, mais parce que les limites de la pharmacopée psychiatrique apparaissaient au grand jour. Et ce malgré l'arrivée sur le marché des fameux inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine dans les années 1980 et 1990. Ces nouvelles recherches mettent en évidence que le LSD et la psilocybine agissent principalement sur les récepteurs de… la sérotonine, comme les ISRN. Cependant, comme le déclarait en 2022 le Pr Bruno Aouizerate, psychiatre à Bordeaux Neurocampus, dans nos colonnes (*lire* Sciences et Avenir *n° 900*), « *il s'agit de produits qui peuvent avoir une action rapide avec des mécanismes différents de ceux qu'on a explorés jusqu'à présent.* » Et en cela, « *ce sont des pistes extrêmement intéressantes et prometteuses* », ajoutait ce dernier.
Reste malgré tout à élucider les mécanismes d'action de ces substances. Des examens d'imagerie cérébrale ont révélé qu'elles entraîneraient une hyperconnectivité des réseaux de neurones et une modulation de la neuroplasticité pouvant influencer positivement les schémas de pensée et les comportements.
En 2020, l'agence du médicament amé-

PHARMACOLOGIE

Les psychédéliques en microdose à l'étude

Se procurer sur Internet des petites quantités de psilocybine, la substance active des champignons magiques, n'a rien de compliqué. Bien qu'illégal, ce commerce est florissant. De quoi s'agit-il précisément ? La définition du microdosage est encore un peu floue, mais d'après une étude parue en 2019 dans le *Journal of Psychopharmacology*, « *le microdosage psychédélique correspondrait à 5-10 % d'une dose psychoactive habituelle et se situerait entre une dose pharmacologique complète (100 %) et une "microdose pharmacologique"* ». Si le risque d'hallucinations est très faible avec une telle dose, ces capsules de champignons magiques en poudre sont-elles pour autant sans danger ? Ont-elles des effets bénéfiques ? Impossible de répondre dans la mesure où aucune étude n'a été menée, notamment sur des personnes souffrant de problèmes de santé mentale. Rotem Petranker, directeur du Centre canadien des sciences psychédéliques, a commencé en juillet 2023 la toute première visant à évaluer les effets du microdosage de psilocybine sur les troubles dépressifs majeurs. Quelque 100 participants vont recevoir une microdose une fois par semaine pendant neuf semaines dans un environnement contrôlé par des professionnels de la santé. Tout au long de cet essai, les participants seront invités à passer des évaluations cognitives et diagnostiques afin de suivre les effets de la psilocybine. La même équipe avait mené une étude en 2020 en interrogeant 6753 personnes ayant pratiqué le microdosage au moins une fois au cours des 12 derniers mois. Ils rapportaient une amélioration de l'humeur, de la créativité, de la concentration et de la sociabilité. Selon les chercheurs, « *les avantages associés au microdosage l'emportent largement sur les difficultés* » mais il était urgent de mener des études en double aveugle, contrôlées par placebo… Les premiers résultats sont attendus pour ce mois de février.

ricaine (FDA) a accordé le statut de traitement à la psilocybine dans le cas de la dépression résistante. La Suisse, le Canada et tout récemment l'Australie ont d'ailleurs déjà autorisé, dans des cadres expérimentaux, l'utilisation des champignons hallucinogènes ainsi que l'ecstasy pour le traitement des états de stress post-traumatique et de certains types de dépressions sévères. En France, aucune prescription de psilocybine n'est autorisée mais le Pr Philippe Fossati, chef du département de psychiatrie adulte à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, va piloter un essai dans la dépression sévère.

SYMPTÔMES

Comment reconnaître la dépression

Diagnostiquer un épisode dépressif, c'est la première étape pour s'en sortir. Afin de faire la différence avec une déprime passagère, une liste de neuf symptômes a été établie. Une dépression est caractérisée lorsque cinq d'entre eux sont ressentis pendant au moins deux semaines :

- **Tristesse** inhabituelle présente pratiquement toute la journée, presque tous les jours.
- **Diminution du plaisir** pour presque toutes les activités et incapacité d'accomplir les actions de la vie quotidienne.
- **Perte ou gain de poids** significatif en l'absence de régime.
- **Insomnie ou hypersomnie** presque tous les jours.
- **Agitation ou ralentissement** psychomoteur.
- **Réduction de l'énergie** ou fatigue anormale.
- **Diminution** importante de l'estime de soi.
- **Difficultés d'attention** et de concentration
- **Pensées suicidaires** récurrentes.

Les promesses de la neuromodulation

Les pays pionniers se sont appuyés sur des études qui ont déjà attesté de l'efficacité de ces drogues. Le plus grand essai clinique (de phase 2), publié en 2022 dans le *New England Journal of Medicine*, incluant 233 patients dans dix pays, a ainsi révélé que près de 30 % des malades ayant reçu une dose unique de 25 mg de psilocybine étaient en rémission de leur dépression résistante trois semaines après le traitement. En 2025, des essais de phase 3 devraient permettre de comparer les champignons hallucinogènes aux traitements existants et de faire toute la lumière sur les effets secondaires. En effet, 77 % des participants ont souffert d'effets secondaires tels que des maux de tête, des nausées et des vertiges. Et des effets indésirables graves, notamment des pensées suicidaires, ont été observés chez 3 % des participants. L'administration de psychédéliques reste d'ailleurs très encadrée. Aux hôpitaux universitaires de Genève (Suisse), qui proposent depuis plusieurs années la psychothérapie assistée par psychédélique, une infirmière assure une surveillance constante tout au long de la séance pendant laquelle la psilocybine ou le LSD sont délivrés par voie orale. Un rendez-vous le lendemain et un mois après sont également prévus. Qualifiés par bon nombre de psychiatres de « *révolution* », les psychédéliques doivent malgré tout faire l'objet de davantage de recherche avant de rentrer dans la pratique.

Cette ébullition autour des psychédéliques ne doit pas masquer un autre grand pan de recherche, celui de la neuromodulation. Dans la lignée de l'électroconvulsivothérapie, la forme la plus ancienne de stimulation électrique du cerveau réalisée sous anesthésie générale, d'autres formes moins invasives ont vu le jour. « *L'une des plus prometteuses est la stimulation magnétique transcrânienne (rTMS)* », déclare Charles Laïdi. Concrètement, une bobine électromagnétique placée au contact de la tête envoie un champ magnétique sur une zone bien précise du cortex préfrontal dorsolatéral afin de moduler l'activité des neurones. Grâce à une IRM de repos, le ciblage de la zone et l'intensité sont personnalisés.

En juillet 2022, la Haute Autorité de santé (HAS) concluait dans son rapport qu'« *en phase aiguë de dépression, les résultats des méta-analyses comparant les deux stratégies de traitement, l'une intégrant la rTMS et l'autre, la procédure factice, montrent qu'il n'existe pas de preuve formelle de l'efficacité spécifique de la rTMS comparée à la procédure factice* ». Mais « *la HAS n'a évalué que le protocole conventionnel* [une séance quotidienne pendant 4 à 6 semaines], indique Charles Laïdi. *Or, en 2021, une équipe de Stanford [États-Unis] a montré qu'un protocole intensif de 10 séances par jour pendant 5 jours était plus efficace.* » Un mois après le traitement, 79 % des participants avaient obtenu une rémission de leurs épisodes dépressifs. En France, beaucoup de centres pratiquent déjà la rTMS mais ce traitement n'est pas remboursé par la Sécurité sociale.

L'éventail thérapeutique s'est donc élargi ces dix dernières années. Sans compter que les psychothérapies restent des stratégies valides dans le traitement de la dépression *(lire p. 62)*. Mais quel trai-

F. GUENET : DIVERGENCE

« Malgré le manque de moyens, la recherche en psychiatrie avance. Nous sommes même à un tournant capital »

Marion Leboyer, psychiatre à l'université Paris-Est Créteil et directrice générale de la fondation FondaMental

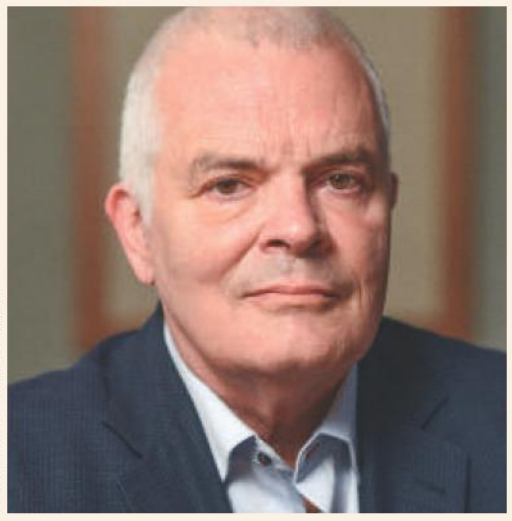
INTERVIEW

PR CHRISTOPHE TZOURIO
ÉPIDÉMIOLOGISTE AU CHU DE BORDEAUX

« La dépression des étudiants demeure un problème massif »

Les cours ont repris en présentiel depuis deux ans et pourtant la santé mentale des étudiants ne s'améliore toujours pas. Pourquoi ?
Nous n'observons aucun retour à la normale. La santé mentale des étudiants reste très affectée par l'épidémie de Covid. Après l'étude Confins publiée en 2021 qui mettait en évidence une très nette dégradation de leur état de santé mentale, nous avons voulu poursuivre nos investigations et avons recruté 2000 étudiants à Bordeaux entre septembre 2022 et avril 2023. Résultat : avant le covid, 26 % déclaraient des symptômes dépressifs modérés à sévères ; après le Covid, ils sont 41 % ! Les pensées suicidaires ont bondi de 50 %. Et nos collègues du service de santé universitaire nous disent qu'ils croulent sous les demandes de prise en charge psychologique.

Cette vague de dépression touche-t-elle uniquement les étudiants et est-elle inédite ?
Les études de Santé publique France montrent un impact plus important chez les jeunes et plus particulièrement les étudiants. Les primo-entrants qui découvrent l'enseignement supérieur et qui n'habitent plus chez leurs parents sont bien sûr plus fragiles. De même que ceux qui ont des antécédents de troubles psychiatriques. Mais,


UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

« Nous pensons que nous assistons à un effet prolongé du Covid »

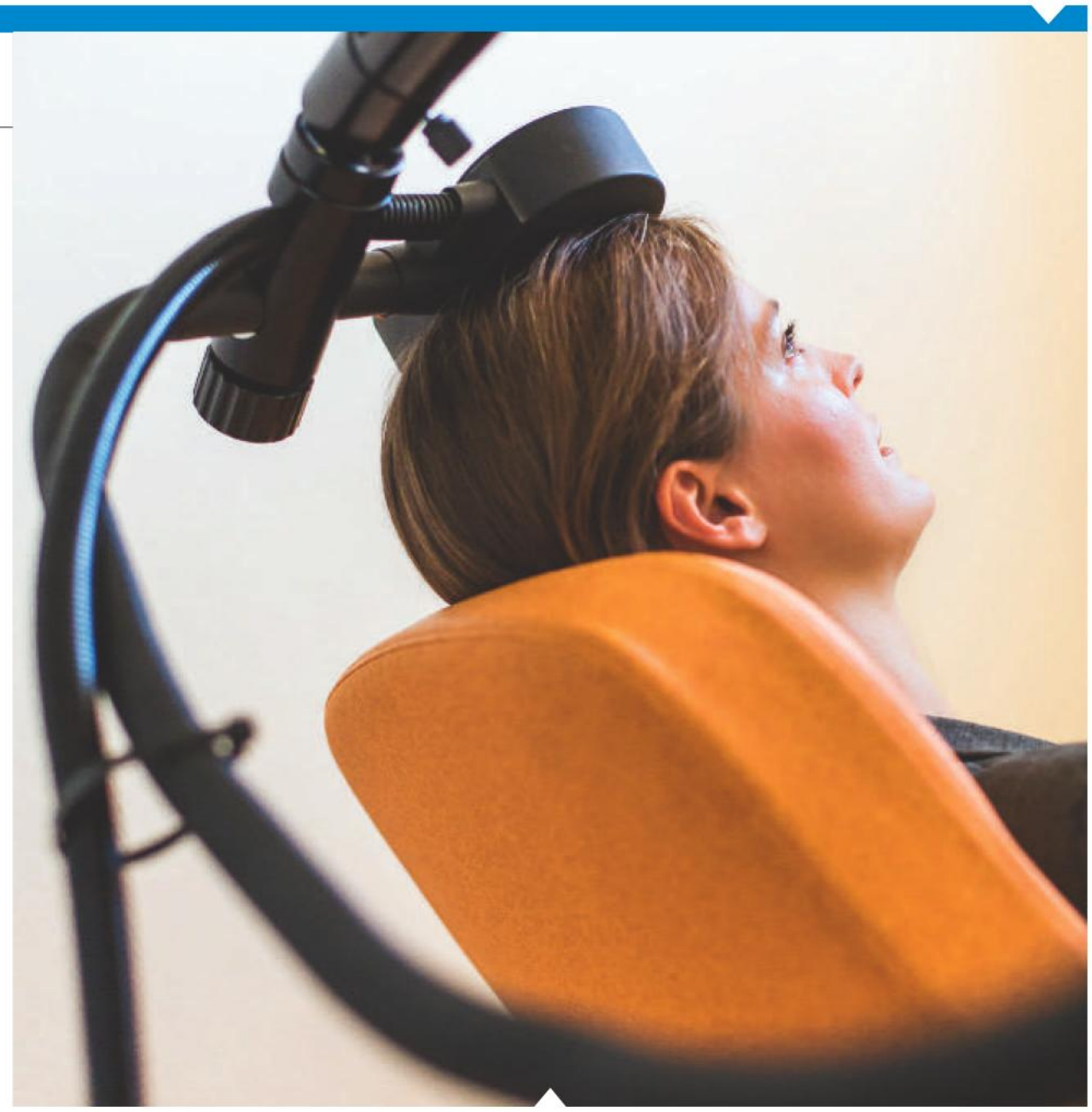
dans nos études, la majorité des étudiants en souffrance n'ont aucun antécédent. Les jeunes issus de milieux favorisés ne sont pas épargnés. Quant à savoir si cette situation est inédite, nous manquons d'études. Cependant, des collègues canadiens avaient observé que trois ans après l'épidémie de Sras (en 2004), les étudiants de Toronto souffraient encore de syndrome de stress post-traumatique et de pensées suicidaires.

Comment expliquez-vous une telle souffrance ?
Les jeunes n'ont pas eu peur de la mort. Le problème numéro un a sans doute été la solitude. C'est arrivé au pire moment pour eux. En effet, le cerveau continue à se développer jusqu'à 25 ans. Et lors de ces dernières années, ce sont les interactions humaines qui sont centrales dans la maturation du cerveau. Nous pensons donc que nous assistons à un effet prolongé du Covid parce que ce développement n'a pas pu se faire correctement. On a l'impression de voir quelque chose qui est de l'ordre du handicap. Je reste malgré tout optimiste. Beaucoup vont s'en sortir. Certains seront même mieux armés pour faire face au chaos de l'existence. Mais, d'autres risquent de développer une pathologie psychiatrique face à de nouvelles contraintes.

Que préconisez-vous pour améliorer la situation ?
Tout d'abord, il faut prendre conscience que nous sommes face à un gros problème collectif, un problème massif ! Les plus de 40 ans ont tendance à sous-estimer les difficultés auxquelles les jeunes sont confrontés. Or, les décideurs appartiennent à cette tranche d'âge… Ensuite, nous devons nous donner les moyens de détecter ceux qui sont en grande souffrance, mais aussi ceux qui ne vont pas bien et qui n'ont pas forcément besoin d'un psy. Des ressources existent mais les jeunes ne les connaissent pas. ■

Propos recueillis par C. C.

tement prescrire à tel patient ? La question reste hélas pour le moment sans réponse, même si l'identification de sous-groupes homogènes de patients progresse. Nous savons déjà qu'*« au moins 40 % des patients déprimés ont une inflammation de bas grade et que cet état entraîne une plus grande résistance aux antidépresseurs »*, déclare Marion Leboyer. Or, le biomarqueur de l'inflammation, la CRP, est très facile à mesurer. L'association d'anti-inflammatoires au traitement antidépresseur donne pour le moment des résultats contradictoires, suggérant la nécessité de resserrer les mailles du filet pour cibler des sous-groupes encore plus précis. Pourquoi pas ceux dont le microbiote intestinal est perturbé ? Les preuves d'une association entre dépression et dysbiose intestinale existent.



GARO/PHANIE

Dans la stimulation magnétique transcrânienne, une impulsion est envoyée dans une zone ciblée du cerveau pour moduler l'activité neuronale.

Un cocktail thérapeutique de 14 souches de bactéries

Deux études publiées dans *Nature Communications* en décembre 2022 ont même permis d'identifier une composition microbienne bien précise pouvant favoriser l'apparition de symptômes dépressifs. Et de nouvelles stratégies thérapeutiques à base de probiotiques commencent à porter leurs fruits. Avec la prise quotidienne d'un cocktail de 14 souches de bactéries pendant huit semaines, des personnes souffrant d'un trouble dépressif majeur ont vu leurs symptômes s'améliorer beaucoup plus que ceux ayant reçu un placebo. Cet essai pilote portant sur 49 personnes, publié en juillet 2023 dans *Jama Psychiatry,* doit bien sûr être répliqué sur de plus grands échantillons.

Plusieurs équipes de recherche parient donc sur une restauration du microbiote ainsi que sur le nerf vague, l'axe cerveau-intestin. Dans une étude Inserm-Institut Pasteur-CNRS parue en mai 2023 dans *Molecular Psychiatry*, toutes les souris saines dont le nerf vague avait été sectionné au niveau de l'abdomen, et à qui on avait transféré le microbiote de souris dépressives, ont été protégées de la maladie. La stimulation du nerf vague par neurostimulation, approuvée dès 2005 par la FDA dans la dépression résistante, se développe quant à elle tout doucement.

Une autre piste pourrait ouvrir la voie à la personnalisation des traitements : les anomalies au niveau des mitochondries. Ces dernières sont essentielles pour maintenir un niveau d'énergie suffisant permettant de libérer des neurotransmetteurs et ainsi favoriser la communication entre les neurones. Si notre métabolisme ne fonctionne pas correctement et produit trop peu de neurotransmetteurs, cela pourrait entraîner une dépression. Mais il n'existe pas à ce jour de biomarqueur facilement mesurable de ce type d'anomalie.

« Malgré le manque de moyens, la recherche en psychiatrie avance. Nous sommes même à un tournant capital », lance Marion Leboyer. La validation des biomarqueurs est en bonne voie et dans son sillon, la quantification du nombre de formes de dépression devrait être possible. Et même si les origines de la maladie restent obscures, Pierre-Michel Llorca se veut optimiste. *« N'oublions pas qu'il y a quinze ans, nous ne parvenions à guérir qu'un petit quart des dépressions résistantes. Avec les stratégies actuelles, on atteint les 40 %. »* ■

C. C.

T. FETERMAN

« Il y a 15 ans, nous ne parvenions à guérir qu'un petit quart des dépressions résistantes. Avec les stratégies actuelles, c'est 40 % »

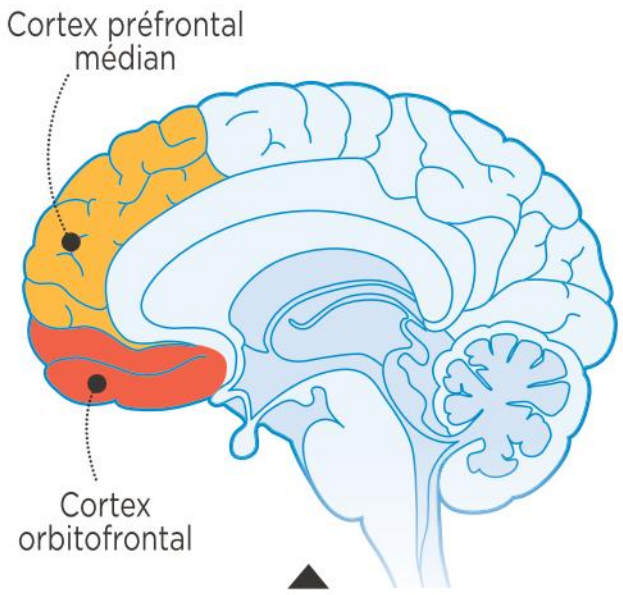
Pierre-Michel Llorca, spécialiste de la dépression résistante et directeur des soins de la Fondation FondaMental

5 mesures d'hygiène mentale contre la dépression

Adopter un mode de vie sain est un puissant moyen d'agir sur sa santé mentale. Les comportements bénéfiques : une alimentation adéquate, suffisamment d'activité physique, un sommeil satisfaisant, un bon réseau social, pas de tabagisme.

Une réduction de 57 % du risque de dépression avec un mode de vie « sain » : telle est la conclusion à laquelle viennent de parvenir Yujie Zhao et ses collègues des universités de Fudan (Shanghai, Chine) et de Cambridge (Royaume-Uni). Les chercheurs ont analysé les comportements et la santé de près de 300 000 personnes pendant une dizaine d'années, grâce à la gigantesque cohorte UK Biobank. Leur étude, publiée en septembre 2023 dans *Nature Mental Health*, s'ajoute à la longue liste de travaux dont la conclusion est unanime : le mode de vie est un puissant moyen d'agir sur sa santé mentale.

Les comportements bénéfiques considérés ici peuvent être regroupés en cinq grandes catégories : une alimentation adéquate, suffisamment d'activité physique, un sommeil satisfaisant, de bonnes relations sociales, pas de tabagisme *(lire les encadrés pp. 58 à 61)*. Bien plus qu'à de simples corrélations, les chercheurs ont procédé à ce qu'on appelle une « randomisation mendéléienne », une méthode statistique qui permet, dans certaines configurations, d'établir des relations de causalité. L'apport de cette méthode est précieux, dans ce contexte où l'on se pose toujours la question de l'œuf et de la poule : est-ce parce qu'on mange mal et qu'on ne bouge pas assez que l'on devient dépressif, ou bien est-ce la dépression elle-même qui conduit à ces habitudes peu saines ? Les deux sont vrais, selon cette étude.



BRUNO BOURGEOIS

Ces deux zones cérébrales, importantes pour la régulation émotionnelle, sont plus épaisses chez les personnes ayant un mode de vie sain.

Les chercheurs ont aussi analysé les profils génétiques des participants et le mode de vie s'est révélé protecteur même chez ceux qui présentent une forme de fragilité naturelle : « *Ces résultats montrent que le mode de vie protège de la dépression y compris chez les personnes à haut risque génétique*, s'enthousiasme le psychiatre et chercheur Guillaume Fond, auteur du livre *Bien manger pour ne plus déprimer* (Odile Jacob) et responsable d'un centre expert sur la dépression résistante à l'Assistance publique des hôpitaux de Marseille. *Autrement dit, il n'y a pas de fatalité génétique pour la dépression. C'est un message capital.* »

Des habitudes de vie peu saines ont des effets sur le cerveau

Si le mode de vie exerce une telle influence, c'est qu'il affecte en profondeur l'état et le fonctionnement du cerveau, modulant en particulier le niveau d'inflammation qui y règne. Or une inflammation chronique serait en cause dans de nombreuses dépressions : elle entraînerait notamment la libération de molécules appelées cytokines, qui perturbent la synthèse de neurotransmetteurs essentiels de l'humeur, comme la sérotonine ou la dopamine, et déclenchent la production de composés toxiques pour les neurones. « *Bien manger, dormir suffisamment, faire du sport, tout cela atténue l'inflammation* »,

Le développement des relations sociales est un des leviers permettant de protéger sa santé mentale, selon de nombreuses études.

PHOTOS : BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE

explique Guillaume Fond. À l'inverse, le tabac ou les graisses saturées de la « junk food » l'accentuent, de même que l'isolement social. « *Tout stress psychique entraîne aussi un stress biologique* », souligne le psychiatre.

De nombreux aspects du mode de vie modulent également le stress oxydatif, une forme d'agression interne de la cellule causée par une surabondance de composés très réactifs. Finalement, des habitudes peu saines dégradent le fonctionnement du cerveau, voire l'abîment localement : dans la cohorte UK Biobank, ces habitudes étaient associées à une moindre épaisseur de zones cérébrales importantes pour la régulation émotionnelle, comme le cortex préfrontal médian ou le cortex orbitofrontal. D'autres mécanismes sont plus spécifiques, le sport entraînant par exemple la libération d'une substance qui stimule la croissance neuronale.

Le mode de vie a un tel effet sur le cerveau et le psychisme que, non content de prévenir la dépression, il peut aider à la soigner. C'est particulièrement bien démontré pour l'activité physique, mais les indices s'accumulent aussi pour les autres facteurs. En 2017, la chercheuse australienne Felice Jacka et ses collègues ont mené un essai contrôlé randomisé nommé Smiles (pour Supporting the Modification of lifestyle In Lowered Emotional States), incluant une soixantaine de patients dépressifs se nourrissant mal. Résultat : l'adoption d'habitudes alimentaires plus saines a notablement amélioré leurs symptômes, le tiers d'entre eux entrant même en rémission au bout de trois mois.

Un rapport collectif de l'Inserm publié en 2019 va jusqu'à conseiller la prescription de séances de sport avant tout traitement médicamenteux, du moins pour les dépressions légères à modérées. « *Les études cliniques démontrent qu'un programme d'activité physique adapté est aussi efficace que les antidépresseurs, sans les effets secondaires* », affirme le Pr Grégory Ninot, directeur adjoint de l'Institut Desbrest d'épidé-

ARS PACA

« Le mode de vie protège de la dépression. Autrement dit, il n'y a pas de fatalité génétique pour cette maladie »

Guillaume Fond, psychiatre et chercheur, spécialiste de psychonutrition

miologie et de santé publique (Idesp), un des auteurs du rapport.
Pour les cas plus sévères, les médicaments restent indiqués. Et lorsqu'ils ne fonctionnent pas ? *« L'une des principales raisons pour lesquelles les patients ne répondent pas aux antidépresseurs, c'est le mode de vie,* explique Guillaume Fond. *Dans notre centre expert sur la dépression résistante, nous explorons tous ces facteurs et élaborons souvent un compte rendu qui prescrit par exemple des compléments alimentaires, une activité physique adaptée ou l'arrêt de la cigarette — la moitié des patients qui viennent nous voir fument, alors qu'il est démontré que le tabac augmente la résistance aux antidépresseurs. Nous sommes bien plus proactifs sur cet aspect aujourd'hui qu'il y a cinq ans.* »

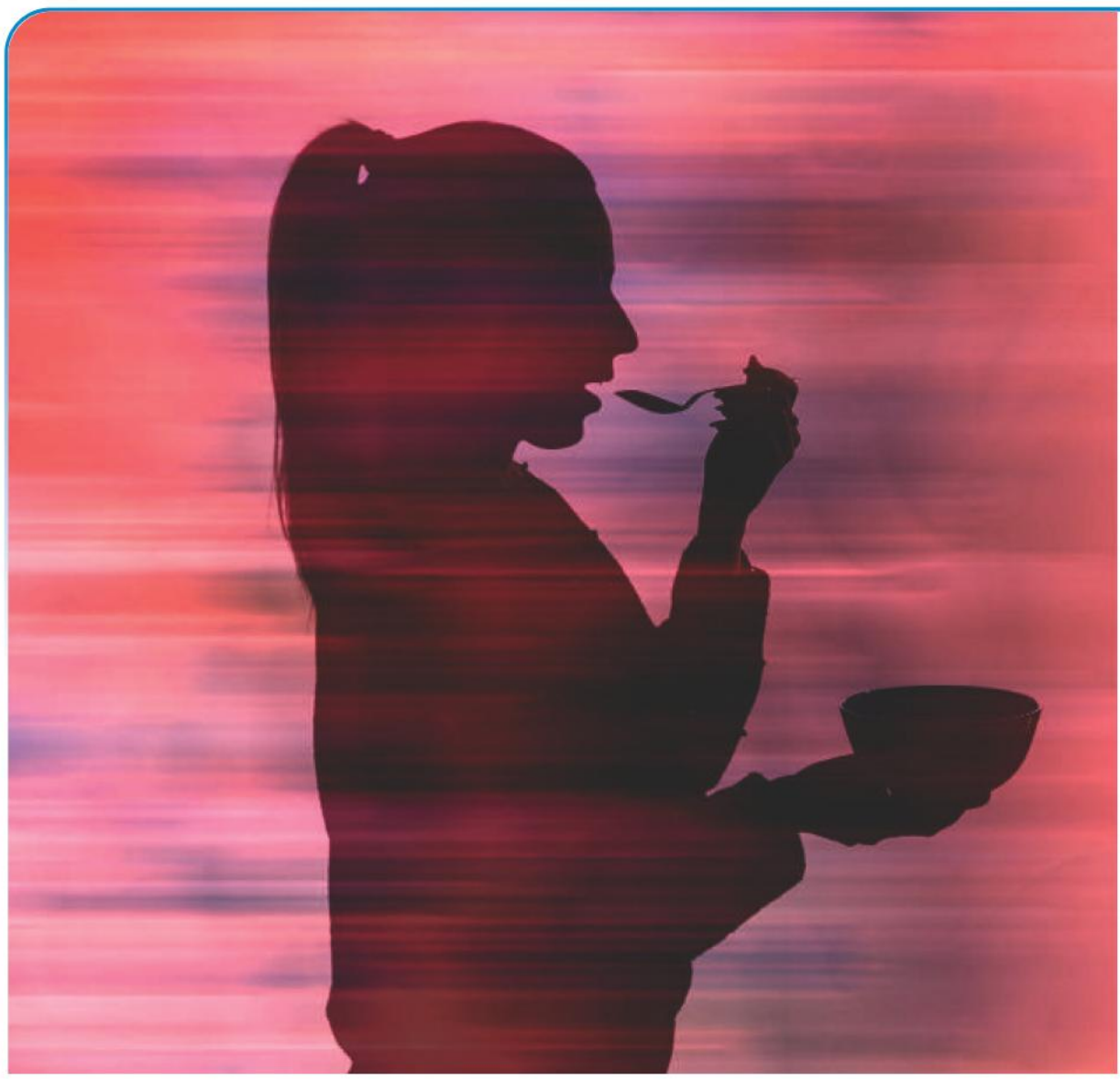
Aliments ultratransformés et sodas pointés du doigt

Ces connaissances commencent aussi à infuser chez les politiques. Dans une récente interview, le chef de l'État Emmanuel Macron évoquait ses mesures pour augmenter le sport à l'école. *« C'est une très bonne chose,* commente Guillaume Fond. *Mais il faudrait aussi insister sur d'autres aspects du mode de vie : dans notre étude Alimental, dont les résultats paraîtront dans le courant de cette année, nous avons montré que la consommation de sodas sucrés et d'aliments ultratransformés est un vrai problème chez les jeunes, démultipliant le risque de dépression.* »
Les séances de sport ou les menus antidéprimes seront-ils bientôt remboursés par la Sécurité sociale ? Pas en prévention, selon Gregory Ninot, mais on commence à l'envisager en traitement. *« C'est l'avenir »*, assène ce spécialiste. Selon lui, ces interventions remboursées incluront aussi des programmes d'éducation thérapeutique, qui expliqueront les bienfaits psychiques d'habitudes saines.
Le mode de vie n'est certes pas l'unique clé de la santé mentale. Travail stressant, harcèlement, traumatisme d'enfance… Autant de facteurs qui *Suite page 60*

SPORT

Un cocktail de substances bienfaisantes dans le cerveau

Pour les adultes, l'OMS (Organisation mondiale de la santé) recommande au moins deux heures et demie par semaine d'activité physique d'intensité modérée (comme une marche rapide), ou une heure et quinze minutes d'activité soutenue (jogging, football, tennis…). Outre un effet apaisant sur l'inflammation cérébrale, le sport entraîne la libération d'un véritable cocktail de substances bienfaisantes dans le cerveau : des neurotransmetteurs qui dopent l'humeur et la motivation, comme les endorphines et la dopamine, mais aussi une molécule qui fait littéralement pousser les neurones, appelée facteur neurotrophique dérivé du cerveau (Brain-Derived Neurotrophic Factor ou BDNF). C'est ce qu'ont montré des expériences où l'on mesurait le taux sanguin de cette molécule chez des volontaires, par exemple avant et après qu'ils ont couru ou joué au badminton. Ainsi, les neurones tissent de multiples connexions nouvelles, inversant la tendance à l'appauvrissement de ces connexions observée dans la dépression.



POUR EN SAVOIR PLUS

- **www.tabac-info-service.fr** répertorie les techniques d'aide à l'arrêt du tabac (substituts nicotiniques, psychothérapie adaptée, etc.) qui ont fait la preuve de leur efficacité.
- Guillaume Fond anime un compte Instagram de culture générale sur la santé mentale : **sciav.fr/924gfond**
- **www.mangerbouger.fr** : recommandations et conseils pratiques issus du Programme national nutrition santé (PNNS).
- **reseau-morphee.fr** : des ressources pour s'informer sur le sommeil et trouver une prise en charge adaptée en cas de trouble chronique.

NUTRITION

Le régime méditerranéen a un rôle protecteur avéré

Les liens entre l'alimentation et le cerveau sont si forts qu'ils sont l'objet d'une nouvelle discipline : la psychonutrition. En matière de lutte contre la dépression, elle recommande tout particulièrement le régime dit méditerranéen, qui s'est révélé le plus protecteur : un peu de poisson gras, beaucoup de fruits, de légumes et de légumineuses, de la viande en quantité modérée (privilégier la volaille)… Son secret ? Il contient des nutriments essentiels à un bon fonctionnement cérébral. Les légumineuses sont par exemple riches en acides aminés comme le tryptophane et la tyrosine, qui sont respectivement des précurseurs de la sérotonine et de la dopamine. Les poissons gras abondent quant à eux en oméga 3, des composants clés des membranes neuronales qui ont en outre des propriétés anti-inflammatoires (à ce titre, les huiles de colza ou de noix représentent une option de choix pour les sauces de salade, car elles contiennent plus d'oméga 3 que la classique huile d'olive). Les mécanismes pourraient aussi passer par la modulation du microbiote intestinal, celui des patients dépressifs étant plus riche en espèces bactériennes qui favorisent l'inflammation. Si une quantité excessive d'alcool accroît le risque de dépression, un petit verre de vin par jour aurait des vertus antidépressives, selon l'étude Alimental (à paraître dans le courant de cette année). Sans doute car certains de ses composés ont des effets antioxydants et régulent la synthèse de divers neurotransmetteurs, ou interfèrent avec eux. Cerise sur le gâteau : le café semble aussi protéger contre la dépression — moins fréquente chez ceux qui en consomment selon une métanalyse de 2017. Là encore, mieux vaut éviter les excès (pas plus de trois ou quatre tasses par jour, voire beaucoup moins pour ceux qui ont des problèmes de sommeil ou de nervosité). Précisons tout de même que Santé publique France recommande de ne pas consommer d'alcool tous les jours.

Suite de la page 58 augmentent fortement la vulnérabilité. Néanmoins, un mode de vie sain rend le cerveau plus résistant et accroît la capacité à faire face aux événements difficiles. Pour Guillaume Fond, l'effet protecteur est même probablement supérieur aux résultats de l'étude de Yujie Zhao, car plusieurs critères pourraient être optimisés, voire ajoutés. Mieux respecter le cycle naturel de la lumière — autrement dit s'exposer davantage à la lumière du jour, et moins aux éclairages artificiels la nuit — diminue ainsi fortement le risque de dépression, selon une vaste étude de 2023, également publiée dans *Nature Mental Health*. « *Un contact régulier avec la nature me semble aussi à recommander pour protéger sa santé mentale,* ajoute Alix Cosquer, chercheuse en psychologie. *Les recherches montrent par exemple qu'une simple marche d'une heure dans un parc améliore l'humeur de patients dépressifs, et ce davantage qu'une promenade en milieu urbain.* »

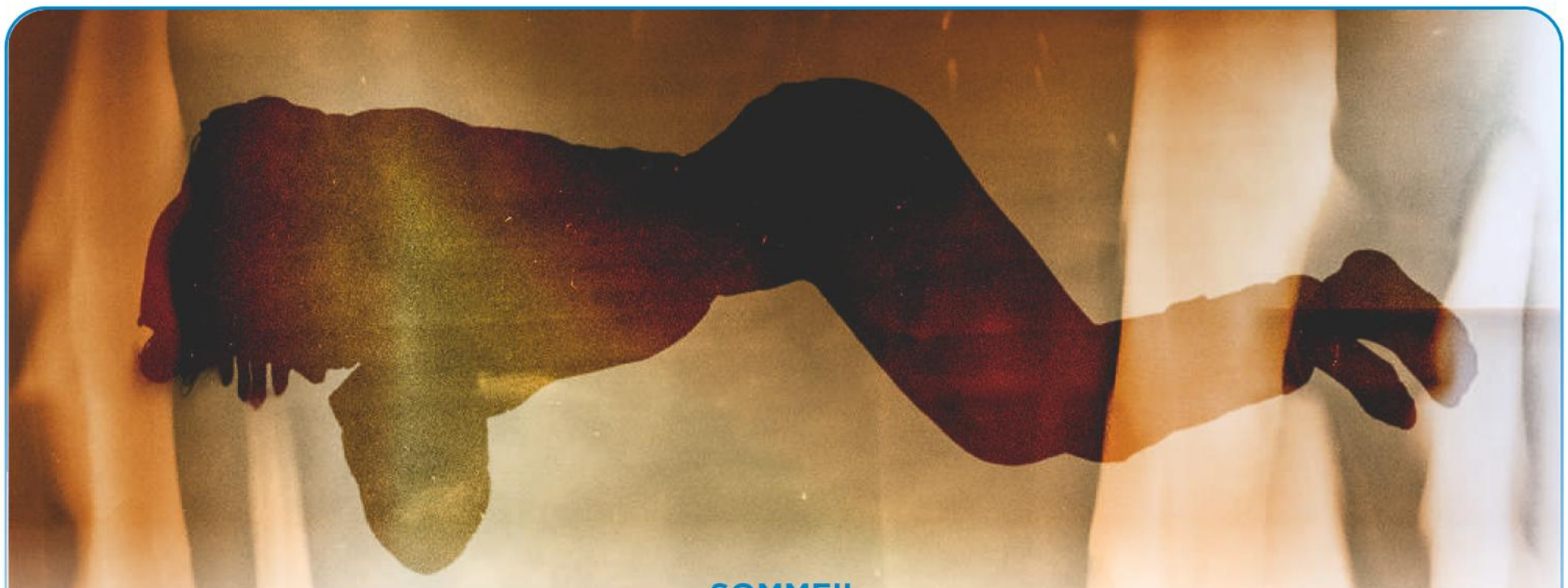
Savoir s'écouter et s'accorder de petits plaisirs

Nous avons donc tout à gagner à adopter quelques bonnes habitudes. « *Bougez dès que vous le pouvez,* conseille Gregory Ninot. *Marchez, faites du vélo, prenez les escaliers plutôt que les escaliers mécaniques ou les ascenseurs…* » Mais il ne s'agit pas de se fixer un programme de spartiate ! Car un mode de vie sain est un mode de vie que l'on est capable de tenir, disent les psychiatres (et les recherches). Pas de remords, donc, si vous vous êtes laissé aller à un dîner un peu arrosé. Même chose pour le sport : les résultats obtenus par le chercheur britannique Patrick Callaghan suggèrent que la prescription d'activité physique à des patients dépressifs est plus efficace lorsqu'on les laisse libres de choisir l'intensité des séances, parce qu'ils se montrent plus assidus. Savoir s'écouter et s'accorder de petits plaisirs est donc aussi l'une des clés d'un mode de vie — durablement — sain. ■ **G. J.**

LIEN SOCIAL

Combattre la solitude

Chorale, foot, club d'échecs ou de lecture… N'hésitez pas à pratiquer des activités collectives ! De nombreuses études montrent que la solitude accroît le risque de dépression, tandis que de bonnes relations sociales sont au contraire protectrices. Appartenir à trois groupes diminue ainsi de 63 % le risque de rechute chez les anciens dépressifs, selon les travaux d'une équipe britannico-australienne. Attention toutefois : ce n'est pas la quantité qui compte, mais la qualité. La protection viendrait du sentiment d'appartenance développé, profondément bienfaisant pour les animaux sociaux que nous sommes, et du réseau d'entraide que nous tissons. Rien ne sert, donc, d'accumuler des centaines de contacts sur les réseaux sociaux, où règnent plutôt des comparaisons incessantes avec des vies idéalisées. En 2018, Melissa Hunt et ses collègues de l'université de Pennsylvanie (États-Unis) ont montré que limiter le temps passé sur ces réseaux à trente minutes par jour entraîne une amélioration de l'humeur et une baisse du sentiment de solitude, en particulier chez les personnes dépressives.



SOMMEIL

Un repos réparateur qui doit être équilibré

« *Le plus court chemin entre désespoir et espoir est une bonne nuit de sommeil* », dit un proverbe anglais. De fait, passer sept à neuf heures par nuit dans les bras de Morphée réduit le risque de dépression. À l'inverse, dormir trop ou trop peu — ou de façon décalée par rapport à son rythme naturel, par exemple lorsqu'on se couche systématiquement tard alors qu'on est plutôt du matin — dérègle les rythmes circadiens, qui font varier de façon cyclique la concentration de multiples neurotransmetteurs essentiels dans le cerveau, comme la dopamine ou la sérotonine. Ce qui finirait par perturber notre état psychologique. Autre facteur expliquant que notre humeur penche vers le noir en cas d'insomnie chronique : nos processus de mémorisation se focalisent alors sur le négatif, comme le suggèrent les travaux des neuroscientifiques américains Matthew Walker et Robert Stickgold (dans leur étude, une privation de sommeil entraînait une meilleure mémorisation de mots comme « chagrin », par rapport à des mots positifs comme « calme »). Plus généralement, une des fonctions du sommeil serait la digestion des émotions désagréables. Rien d'étonnant, donc, à ce que celles-ci deviennent plus envahissantes quand on ne dort pas assez…

TABAC

Arrêter de fumer améliore les symptômes

La fumée du tabac provoque non seulement une inflammation des poumons, mais aussi la diffusion de nombreuses substances délétères dans le sang. Car si les échanges intensifs au niveau des alvéoles pulmonaires nous permettent de respirer, elles nous exposent également à toutes sortes de toxiques. En conséquence, l'inflammation se généralise et gagne le cerveau, accroissant le risque de dépression. Arrêter de fumer est alors associé à une amélioration des symptômes dépressifs chez les patients, et de l'humeur dans la population générale, selon les travaux de la chercheuse britannique Gemma Taylor.

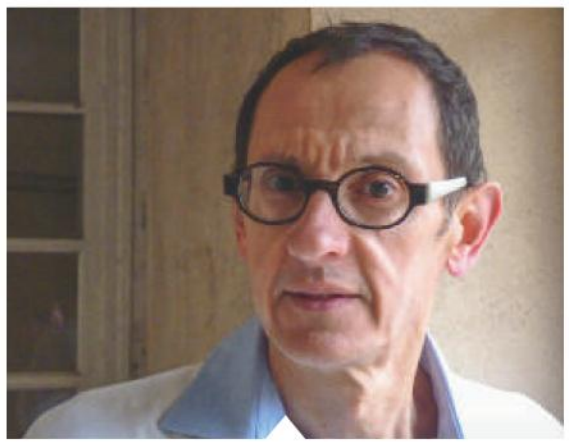
PHILIPPE FOSSATI

CHEF DU DÉPARTEMENT DE PSYCHIATRIE ADULTE À L'HÔPITAL DE LA PITIÉ-SALPÊTRIÈRE À PARIS

« Les psychothérapies agissent sur le cerveau »

Les thérapies cognitivo-comportementales sont bénéfiques à tous les stades du traitement contre la dépression. Car elles agissent sur les réseaux corticaux impliqués dans les croyances dysfonctionnelles et la régulation des états affectifs.

Depuis avril 2022, la Sécurité sociale rembourse la consultation d'un psychologue, à raison de huit séances par an. Pourquoi cette mesure ?
Parce que les psychothérapies font vraiment partie des traitements de base contre les maladies mentales. La Haute Autorité de santé (HAS) recommande ainsi d'y recourir en première intention pour les dépressions légères, ainsi que pour celles d'intensité modérée (si besoin en complétant par un antidépresseur dans ce dernier cas). Quand les symptômes sont plus sévères, en revanche, mieux vaut commencer par les médicaments, notamment parce que les patients sont souvent cloués au lit, sans aucune motivation pour rien, avec des problèmes de concentration ou de mémoire. Les antidépresseurs leur donnent alors une première impulsion, mais très vite, on recommande de compléter par une psychothérapie.
Une précision importante toutefois : je parle ici des thérapies qui ont fait la preuve de leur efficacité contre la dépression, pas des thérapies de bien-être. Leur prescription se fait en articulation avec le médecin, qu'il soit généraliste ou psychiatre.



EMMANUEL BONNET/PARISMATCH/SCOOP

Philippe Fossati est spécialiste de la dépression et des perturbations associées (cognitives, émotionnelles ou cérébrales), sur lesquelles il mène des recherches depuis plus de vingt ans à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière et à l'institut du Cerveau, à Paris.

Quelles sont ces thérapies qui ont fait la preuve de leur efficacité ?
Il y en a de multiples sortes, mais les mieux évaluées scientifiquement sont ce qu'on appelle les thérapies cognitivo-comportementales (TCC). De nombreuses méta-analyses montrent qu'elles sont bénéfiques à tous les stades du traitement contre la dépression, de la neutralisation initiale des symptômes à la prévention des rechutes et des récidives dans les mois et années qui suivent.

Comment fonctionnent ces thérapies cognitivo-comportementales ?
Elles comportent plusieurs volets. D'une part, une « activation comportementale » : il s'agit de remettre en mouvement des patients souvent apathiques, en commençant par des actions toutes simples — par exemple laver une ou deux assiettes quand le bac à vaisselle déborde depuis trois jours. Ensuite, on cherche à modifier les schémas de pensée qui entretiennent une vision négative de soi et du monde : c'est le volet cognitif. Supposez par exemple que vous ayez rendez-vous avec un ami et qu'il ne vienne pas. Si vous allez bien, vous aurez tendance à penser qu'il a eu un empêchement, par exemple qu'il a été retenu par son travail, et qu'il n'a pas pu vous prévenir parce que son téléphone n'avait plus de batterie. Mais un patient dépressif va se dire : « *C'est parce qu'il ne me trouve pas très intéressant.* » Puis il cédera souvent à un biais de surgénéralisation : « *D'ailleurs personne ne s'intéresse à moi.* » Avec naturellement un impact négatif sur ses émotions, qui instaure un cercle vicieux, puisque plus on se sent mal, plus on cède à ce type de pensée. La psychothérapie vise alors à retrouver une compréhen-

BSIP - BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

La psychothérapie permet de normaliser des modèles d'activité cérébrale perturbés par la dépression.

sion plus réaliste de ce qu'on vit et de ce qu'on est. Voilà pour les principes de base des TCC. Mais plusieurs variantes se sont développées au fil du temps. Certaines TCC dites de troisième génération proposent par exemple la méditation de pleine conscience, qui s'est révélée très efficace dans la prévention des rechutes dépressives : cette pratique aide notamment à prendre conscience de ses ruminations négatives, et ainsi à moins se laisser entraîner dans leur cercle infernal.

Ces psychothérapies agissent-elles aussi sur le cerveau ?

Bien sûr ! Il ne faut pas tomber dans une forme de dualisme, selon lequel les psychothérapies agiraient sur l'esprit et les médicaments sur le cerveau. Le chercheur japonais Shinpei Yoshimura et ses collègues se sont par exemple intéressés au cortex préfrontal médian, une zone associée à la réflexion sur soi qui est hyperactive chez les patients dépressifs : ceux-ci réagissent en effet au moindre signal négatif par un torrent de ruminations très égocentrées (*« c'est moi le problème »*), comme on l'a vu avec l'exemple du rendez-vous manqué. Or le cortex préfrontal médian devient moins réactif après trois mois de TCC, signe que les patients parviennent mieux à brider ces ruminations toxiques.

Plus généralement, les psychothérapies agissent sur les réseaux corticaux (à la surface du cerveau), impliqués dans les croyances dysfonctionnelles et la régulation des états affectifs, et sur les réseaux limbiques (plus en profondeur), sièges des émotions. Dans tous ces réseaux, elles normalisent des modèles d'activité cérébrale qui sont perturbés dans la dépression.

« Il ne faut pas tomber dans un dualisme selon lequel les psychothérapies agiraient sur l'esprit et les médicaments sur le cerveau »

Il y a donc une forme d'activité cérébrale typique de la dépression ?

Oui et non. Il existe certaines tendances, mais cette maladie est très hétérogène — entraînant par exemple tantôt des pertes d'appétit et de sommeil, tantôt non — et se traduit par des perturbations cérébrales variées. Cette variabilité peut d'ailleurs nous renseigner sur le type de traitement qui sera efficace. Helen Mayberg, de l'université Emory, aux États-Unis, a montré que lorsqu'une zone appelée insula (appartenant au réseau cérébral des émotions) est moins active que la moyenne, les patients répondent mieux à la psychothérapie qu'aux antidépresseurs — et inversement quand l'insula est hyperactive. Il semble donc que, selon l'état dans lequel il se trouve, le cerveau soit parfois capable d'intégrer les conseils et les informations fournis par le thérapeute pour mieux réguler les émotions négatives, et parfois non (sans doute parce que les dysfonctionnements neurochimiques sont alors trop importants). La mesure de l'activité cérébrale serait donc un outil intéressant pour le choix du traitement, même si nous sommes encore loin d'avoir les moyens matériels pour l'utiliser avec chaque patient… ■ **Propos recueillis par G. J.**

La vérité sur les effets secondaires des vaccins anti-Covid

Les centres de pharmacovigilance se sont livrés à une étude inédite du suivi d'une vaccination massive de la population. Même si plusieurs effets indésirables ont été enregistrés, ce bilan ne remet pas en cause la balance bénéfice-risque de ces médicaments.

Voilà tout juste trois ans que les premiers vaccins contre le Covid-19 ont commencé à être administrés à large échelle en Europe. En particulier, ceux conçus avec la nouvelle technologie de l'ARN messager utilisée par les laboratoires Pfizer et Moderna. Une innovation qui a cristallisé l'essentiel de la méfiance : testés pourtant sur 30 000 personnes chacun avant d'être approuvés, ces vaccins restaient, pour certains, des *« produits expérimentaux »* sur lesquels les autorités sanitaires étaient accusées de n'avoir pas le recul nécessaire pour préconiser des injections par millions. Trois ans plus tard, plus de 900 millions de doses de vaccins ont été administrées dans l'Union européenne, dont 655 millions du Comirnaty de Pfizer et 155 millions du Spikevax de Moderna, soit 90 % de vaccination par ARN messager. En France, l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) comptait en juin 2023 quelque 156,788 millions de doses administrées, dont 123,573 millions du vaccin Pfizer et 24,212 millions pour le Moderna. De quoi tirer un bilan solide des risques d'effets indésirables dus à cette biotechnologie (qui a, entretemps, valu à ses concepteurs de recevoir le prix Nobel de médecine 2023).

Une surveillance des signaux menée au quotidien

Comme pour tout médicament, une surveillance continue des possibles effets indésirables a été conduite au quotidien. C'est précisément la mission qu'a dû remplir le Réseau français des 30 centres régionaux de pharmacovigilance : enregistrer et analyser les déclarations provenant des patients ou des personnels de santé, et coordonner les enquêtes cliniques et épidémiologiques afin de confirmer, ou non, les signaux remontés. *« Les premiers centres de pharmacovigilance existent depuis 1973 en France, donc nous avons une certaine expérience dans le domaine,* rappelle le Dr Aurélie Grandvuillemin, vice-présidente du Réseau français des centres de pharmacovigilance (RFCRPV), qui a coordonné la surveillance des vaccins ces trois dernières années. *Sur le plan théorique, il n'y avait rien de neuf. En revanche, le suivi d'un médicament administré dans un intervalle de temps si court à un nombre aussi important de personnes, c'était tout à fait inédit.* » Une volumétrie à double tranchant : si elle va permettre de mettre en évidence des effets indésirables très rares qui ont statistiquement peu de chance d'apparaître sur des échantillons de 30 000 personnes, elle a l'inconvénient de noyer les enquêteurs d'effets fréquents déjà mis en lumière par les essais cliniques (douleurs et rougeurs au bras, fièvre, fatigue et maux de tête essentiellement). *« Or*

156,788 millions de doses
de vaccins injectées en France (à juin 2023).

200 000 cas
d'effets secondaires déclarés à l'ANSM

dont 25 % étaient classés « graves », soit un taux de déclaration de 0,03 %.

VOISIN/PHANIE

Un cas déclaré d'effet indésirable ne signifie pas qu'il est imputable au vaccin. C'est à l'enquête de pharmacovigilance de le déterminer.

notre objectif, c'est d'identifier de nouveaux signaux non documentés dans les essais cliniques pour améliorer la connaissance des effets indésirables des vaccins », insiste Aurélie Grandvuillemin. En tout, pour les près de 157 millions de doses tous vaccins confondus en France, près de 200 000 cas d'effets indésirables ont été déclarés à l'ANSM dont 25 % (environ 50 000) étaient classés « graves », soit un taux de déclaration de 0,03 %. Sauf qu'un « cas déclaré » ne signifie pas que l'effet est imputable au vaccin. C'est justement à l'enquête de pharmacovigilance de le déterminer.

Le cas des thromboses — des petits caillots se formant dans la circulation sanguine — déclarées dès le printemps 2021, éclaire sur la façon dont une politique vaccinale est ajustée à la surveillance. *« Comme d'autres pays, nous avons assez vite émis un signal à ce sujet, car nous recevions un certain nombre de déclarations pour des patients avec ou sans facteurs de risque préalables vaccinés par Pfizer, Moderna ou AstraZeneca. Il se passait donc potentiellement quelque chose* », raconte Aurélie Grandvuillemin. Deux études épidémiologiques sont alors lancées, qui ne montrent aucun surrisque pour les vaccins à ARNm. En revanche, elles confirment le signal pour le vaccin à adénovirus d'AstraZeneca chez les moins de 55 ans. En avril 2021, l'Agence européenne du médicament évalue le risque de ces thromboses atypiques à 1/100 000 vaccinés. Le type d'effet est si rare qu'on a mathématiquement peu de chances de le détecter dans un essai clinique sur 30 000 personnes. L'ANSM recense alors en France 30 cas de thromboses rares, dont neuf décès, sur près de 4 millions de doses injectées avec le vaccin d'AstraZeneca. C'est ce qui a conduit à modifier les recommandations vaccinales pour ne réserver celui-ci qu'aux plus de 55 ans chez qui les événements thrombotiques n'apparaissaient pas. Avant qu'il ne soit progressivement abandonné dans les mois qui suivent. *« Outre cet effet thrombotique très rare, les vaccins à adénovirus (AstraZeneca et Janssen) ont été mis de côté car ils avaient un rapport bénéfice-risque moins bon que ceux à ARNm, avec des réactions post-vaccinales classiques (douleurs au bras, fièvre et maux de tête) plus fréquentes et plus sévères* », précise Aurélie Grandvuillemin.

Le cas du vaccin unidose de Janssen (Johnson & Johnson), qui promettait de faciliter l'immunisation, est un autre exemple des résultats de la phar-

SIMON LAMBERT / DIVERGENCE

Selon l'OMS, un peu plus d'un million de vies auraient été sauvées entre décembre 2020 et avril 2023 grâce à la vaccination, dont 96 % concerneraient les plus de 60 ans.

macovigilance. Autorisé en mars 2021 par la Haute Autorité de santé (HAS), il est injecté à 1 million de personnes en France avant fin août. Mais s'avère insuffisamment protecteur contre le risque de Covid-19 sévère. *« Aux mois de juillet et d'août, nous avons reçu des signalements des services de réanimation,* se souvient Aurélie Grandvuillemin. *Ils constataient que les patients vaccinés avec la dose unique de Janssen étaient proportionnellement plus nombreux dans leur service que pour d'autres vaccins. »* Décision est donc prise de doubler le vaccin avec une dose de Pfizer… et d'abandonner le fameux vaccin unidose à la fin de l'année.

Quant aux vaccins à ARNm, qui constituent donc 90 % des 100 millions de doses administrées entre janvier et novembre 2021, plusieurs signaux très rares mais potentiellement sérieux ont pu être confirmés au niveau européen. Le lien est alors avéré avec ces effets indésirables inattendus : la myocardite/péricardite, une inflammation du muscle cardiaque *(lire l'encadré p. 67)*, l'hypertension artérielle et les saignements menstruels importants. Sur ces deux derniers effets, la fréquence est trop faible pour être correctement évaluée à ce jour.

Pour Moderna, il faut ajouter un phénomène inédit, celui d'une réaction tardive au niveau du site d'injection. *« Une douleur au bras qui débutait cinq jours à dix jours après la vaccination, ce n'est pas grave, mais très inhabituel. Et l'effet a été difficile à identifier tant on nous remontait de cas de douleurs au bras classiques, qui noyaient un peu l'événement »*, précise Aurélie Grandvuillemin. Et puis, il y a toutes les réactions connues aux vaccins : peu fréquentes (entre 1 et 10 cas pour 1000) douleurs aux extrémités, insomnies, malaise, asthénie, atteinte des ganglions lymphatiques… rares (entre 1 et 10 cas/10 000), comme l'urticaire, l'angio-œdème ou la paralysie faciale transitoire. Voire très rares (moins d'1 cas pour 100 000) comme pour l'anaphylaxie. Selon une étude franco-américaine, ce choc allergique survient entre 2,5 et 11 fois pour 1 million d'injections.

Les experts toujours sur le qui-vive malgré un bilan favorable

« Mais cela ne concerne que les effets confirmés à l'étage européen, reprend Aurélie Grandvuillemin. *Il y a d'autres signaux non confirmés à l'heure actuelle qui, pour nous, sont très forts. Les discussions au niveau européen sont compliquées, mais on y croit quand même beaucoup de notre côté. »* C'est le cas des troubles du rythme cardiaque, des troubles de l'audition ou du déclenchement d'un zona, lorsque le virus de la varicelle se réactive par des éruptions cutanées douloureuses. Autant d'effets dont la rareté ne remettrait pas en cause la balance bénéfice-risque à l'aune de laquelle sont jugés les médicaments : en avril 2023, une étude de l'Organisation mondiale de la santé calculait qu'entre décembre 2020 et avril 2023, le vaccin avait directement évité un peu plus d'un million de décès en Europe, dont 96 % concernaient des personnes de plus de 60 ans. Et bien plus encore de passages en réanimation : *« Le bilan aujourd'hui de ces vaccins à ARNm, c'est*

SURVEILLANCE

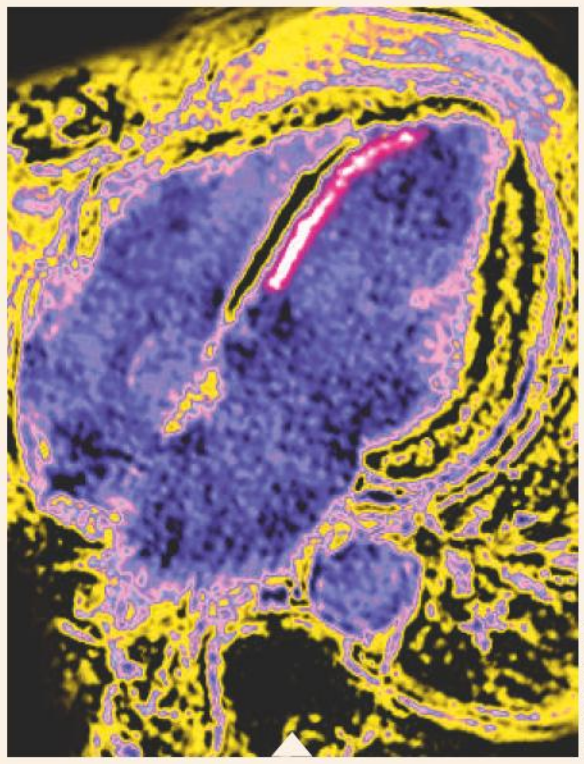
Encore des zones d'ombre

Plusieurs signaux restent en cours de surveillance, que ce soit au niveau national ou européen. Polyarthrite rhumatoïde, hépatite auto-immune, pancréatite, thyroïdite, syndrome de Guillain-Barré… Depuis 2022, la possibilité d'acouphènes et de pertes auditives post-vaccinales soudaines est ainsi explorée. Bien que rarissimes (moins de 0,20 cas/100 000 vaccinés) les quelques dizaines de cas recensés pourraient être dus à une ototoxicité médicamenteuse, provoquant par exemple une réaction auto-immune. Mais plus un événement est rare, plus l'enquête clinique au service de la pharmacovigilance se révèle complexe. Et quand bien même la fréquence de ces effets ne remet pas en cause la balance bénéfice-risque des vaccins, l'objectif reste d'avoir la vision la plus exhaustive possible des effets secondaires potentiellement provoqués par les vaccins.

CARDIOLOGIE

Des myocardites sept fois moins fréquentes avec le vaccin

À l'été 2021, est identifié un risque d'inflammation du muscle cardiaque (myocardite ou péricardite) dû au vaccin Moderna chez les moins de 30 ans. Le signal conduira à réserver ce vaccin aux plus de 30 ans. Mais avant la fin de l'année, cet effet indésirable est confirmé pour l'ensemble de la population vaccinée, que ce soit par le Comirnaty de Pfizer ou le Spikevax de Moderna. Une étude israélienne calcule une incidence moyenne de 2,13 cas pour 100 000 personnes ayant reçu au moins une dose de vaccin ARNm. Avec une fréquence maximale de 10,69 sur 100 000 chez les hommes âgés de 16 à 29 ans. Le fait de voir le cœur ainsi touché a de quoi semer le trouble, même si c'est un effet déjà relevé pour d'autres vaccins. Pourtant, 98 % des cas rapportés se révèlent bénins ou modérés, d'évolution favorable.



SPL/SUCRÉ SALÉ

Inflammation cardiaque chez un jeune patient, observée par IRM.

Surtout, il va s'avérer que le risque de myocardite est autrement plus important lors d'une infection par le Covid-19 : une méta-analyse publiée en août 2022, regroupant 22 études épidémiologiques sur un total de plus de 55 millions de vaccinés et 2,5 millions de cas d'infection au Covid-19, démontre que le risque d'inflammation cardiaque est plus de sept fois plus important chez les personnes infectées par le coronavirus que chez celles ayant été vaccinées. Ce type d'inflammation est, en effet, une des caractéristiques de l'infection. Enfin, les études menées depuis sur la physiopathologie des myocardites post-vaccinales montrent qu'elles sont dues à une plus grande réactivité du système immunitaire chez certains individus, en particulier les jeunes. Et puisque l'effet survenait surtout après la dexième vaccination, décision a été prise d'allonger le délai entre la première et la seconde dose pour réduire le risque.

une efficacité et une sécurité rarement observées. Avec une balance bénéfice-risque très acceptable au regard de la maladie qu'ils préviennent et de la gravité et de la fréquence des effets indésirables », tranche l'experte. D'autant que la plupart des effets secondaires des vaccins se révèlent moins fréquents que lors d'une infection par le Covid-19 *(lire l'encadré ci-dessus)*.

Reste que les experts de la pharmacovigilance demeurent sur le qui-vive, même si le nombre de dossiers s'est drastiquement restreint depuis un an. Pour chaque déclaration, ils doivent toujours rassembler un maximum de documentation sur les patients, les troubles déclarés, leurs antécédents, le contexte du signalement, des analyses biologiques, des imageries, etc.

Le but est d'établir un diagnostic différentiel en éliminant petit à petit les autres causes possibles pour déterminer quel est le rôle du vaccin dans la genèse, l'aggravation ou la révélation de cette maladie. *« C'est parfois très compliqué, et il faut composer avec des cas presque insolubles pour lesquels on est incapable de trancher : le lien ne peut être établi, mais ne peut pas être exclu non plus »*, rappelle Aurélie Grandvuillemin. C'est le cas pour la grande majorité des 11 448 déclarations de décès recensés par l'Agence européenne du médicament en avril 2023. Des événements qui arrivent le plus souvent chez des personnes âgées pour lesquelles les autopsies sont rarement accordées. Reste qu'aucune surmortalité n'a pu être attribuée à la vaccination. ■ **Hugo Jalinière**

AURÉLIE GRANDVUILLEMIN

« Le bilan aujourd'hui de ces vaccins à ARNm, c'est une efficacité et une sécurité rarement observées »

Aurélie Grandvuillemin, vice-présidente du Réseau français des centres de pharmacovigilance (RFCRPV)

Comment les traumatismes se transmettent

Les effets d'événements traumatisants peuvent se faire sentir sur plusieurs générations. Des chercheurs ont déjà montré que les troubles du comportement dus au stress peuvent être légués chez des rongeurs à leur progéniture.

Famines, guerres, crises économiques : l'histoire de l'humanité est jalonnée d'événements traumatisants. Qui n'affectent pas que la génération qui les subit, avancent les scientifiques depuis une dizaine d'années, mais aussi leur descendance, et ce sur plusieurs générations. Les personnes conçues lors d'événements traumatisants vieillissent et meurent plus rapidement que le reste de la population. Elles sont aussi plus souvent sujettes à des maladies métaboliques comme le diabète ou l'obésité. Ainsi, selon une étude publiée dans les *PNAS* fin 2022, les individus dont la mère était enceinte durant la Grande Dépression aux États-Unis ont présenté un risque accru de mortalité et de déclin physiologique. D'après l'analyse du sang d'environ 800 personnes, les effets du traumatisme se répercutent au niveau cellulaire. Ainsi, les cellules d'individus nés dans des États fortement touchés économiquement durant cette longue crise ont montré des signes de vieillissement anormalement rapides. Dans une étude de 2014, une équipe américano-néerlandaise avait déjà constaté que les personnes ayant vécu la famine *in utero* entre l'hiver 1944 et mai 1945 aux Pays-Bas sont mortes plus jeunes que celles nées avant ou après. D'autres études ont mis en évidence une augmentation du diabète au sein de cette même population.

UZH-ETHZ

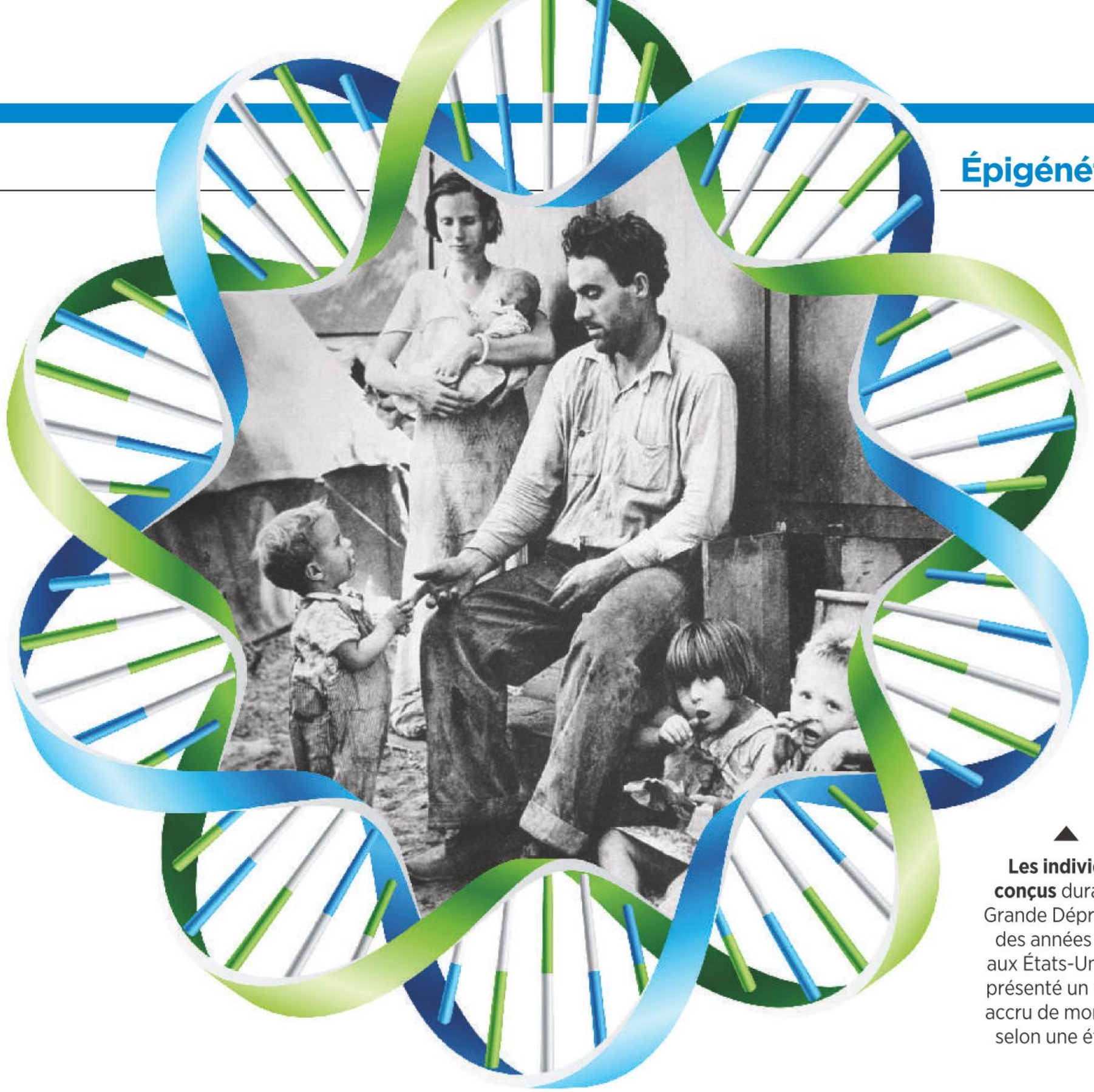
« On ne peut pas extrapoler aux humains les résultats obtenus chez des souris de laboratoire »

Isabelle Mansuy, neurogénéticienne à l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse)

Rigoureusement, ce ne sont pas les traumatismes eux-mêmes qui sont transmis, mais leurs conséquences chez les personnes qui les ont subis : troubles du comportement, de la mémoire, de l'équilibre ou du métabolisme. Parfois aussi des troubles immunitaires, cardiaques, ou encore des modifications des microbiomes. Les symptômes et leur intensité dépendent du trauma — au-delà des guerres et des famines, il peut s'agir par exemple de violences domestiques —, de la façon dont il a été subi, du moment dans la vie (dans la petite enfance ou à l'âge adulte) et de sa durée.

Des micro-ARN porteurs d'informations héréditaires

Mais, l'enfant étant exposé depuis sa vie fœtale aux mêmes traumatismes que ses parents, cette transmission ne peut-elle pas s'expliquer par les seules conditions sociales et l'environnement psychologique familial *(lire l'interview p. 70)* ? Tant de facteurs entrent en jeu que les éléments de preuve chez l'humain sont difficiles à isoler. Aussi les scientifiques testent l'hypothèse d'une



▲ **Les individus conçus** durant la Grande Dépression des années 1930 aux États-Unis ont présenté un risque accru de mortalité, selon une étude.

DOROTHEA LANGE / PETER NEWARK AMERICAN PICTURES / BRIDGEMAN IMAGES - SHUTTERSTOCK

base biologique de cette transmission chez l'animal.

Dès 2014, la biologiste Isabelle Mansuy, de l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse), a montré avec son équipe que les troubles du comportement dus au stress peuvent être légués aux générations suivantes chez des rongeurs (*Nature Neuroscience*). De jeunes souris mâles ont été séparées de leurs mères à plusieurs reprises lors des premiers jours après la naissance. S'est alors développé un étonnant trouble du comportement : les jeunes souris ont perdu en partie leur crainte naturelle des espaces ouverts et de la lumière. Surtout, leur progéniture a présenté par la suite le même comportement alors qu'elle n'avait pas été exposée au stress. Comme l'étude n'a porté que sur des individus mâles, les chercheurs en ont déduit que la transmission des conséquences des traumatismes ne s'était pas faite de la mère à l'enfant *in utero*. Ces résultats ont été par la suite reproduits et précisés. Selon ceux publiés en 2022, la transmission paternelle s'observe jusqu'à cinq ou six générations successives. La transmission maternelle existe également : elle a été mise en évidence pour deux générations. *« On ne peut pas du tout extrapoler aux humains »*, met toutefois en garde la généticienne. En particulier parce que chez les souris de laboratoire, la diversité génétique est très faible, contrairement aux populations humaines. Ce modèle animal ne permet donc pas de reproduire la diversité des comportements observés chez les humains.

5 à 6
générations
La durée de la transmission paternelle des effets des traumatismes chez les souris.

Il n'en reste pas moins qu'il faut expliquer comment de jeunes individus présentent les mêmes troubles du comportement que leurs aïeux ayant vécu une situation traumatisante. Selon Isabelle Mansuy, l'explication est à chercher dans les modifications de l'épigénome, c'est-à-dire des modifications chimiques sur des gènes qui conduisent à changer leur expression. Plusieurs mécanismes peuvent entrer en jeu : l'ajout d'une structure chimique — un groupement méthyle — sur l'ADN, la modification de protéines impliquées dans le compactage de l'ADN — les histones —, ou encore l'action de micro-ARN qui régulent l'expression de certains gènes. *« Les recherches se sont d'abord concentrées sur la méthylation de l'ADN, car c'est techniquement assez facile de la mesurer ; des kits existent pour cela chez les humains »*, explique Isabelle Mansuy. Facile mais peut-être trompeur. ▶

X. BENAROUS

3 QUESTIONS À

XAVIER BENAROUS

PÉDOPSYCHIATRE À L'HÔPITAL TROUSSEAU, À PARIS

« La petite enfance est un moment crucial »

Quel regard porte la pédopsychiatrie sur la transmission de traumatismes ?
Plusieurs mécanismes entrent en compte dans la transmission transgénérationnelle des symptômes liés au stress : une composante génétique, une de nature socioculturelle, une autre liée à la parentalité (l'exposition à des modalités de réponse au stress), et enfin une composante environnementale liée tout particulièrement au climat affectif qui entoure la toute petite enfance. Ces quatre facteurs peuvent jouer des rôles différents selon les étapes de la vie.
La petite enfance est un moment crucial pour déjouer le fardeau de la transmission des traumatismes.
Des travaux chez l'animal ont montré que le soin apporté par les mères envers leur progéniture non seulement diminue le stress, mais participe à la maturation de la structure cérébrale impliquée sur le plan neuro-hormonal dans la réponse au stress. Ces travaux ont mis en évidence une transmission transgénérationnelle de ces modifications.

Qu'apportent les recherches en épigénétique sur cette question ?
Elles ouvrent un champ fascinant, notamment pour éviter une dichotomie entre inné et acquis. Il semble évident désormais que les mécanismes épigénétiques jouent un rôle dans l'émergence des troubles psychiatriques où l'environnement a un poids crucial, comme dans le cas des troubles du stress post-traumatique.
Ce qui est intéressant, c'est que d'autres travaux ont montré que des mécanismes épigénétiques étaient impliqués dans la modulation de symptômes de patients qui présentent un trouble du neurodéveloppement, comme le trouble de déficit de l'attention.

Le fait de comprendre les mécanismes biologiques sous-jacents à la transmission permet-il d'améliorer la prise en charge des personnes concernées ?
À l'heure actuelle, non. Mais on espère qu'un jour, cela aidera à la prise en charge, à la fois pour guider les thérapeutiques (médicamenteux ou non), mais aussi pour identifier des groupes de patients qui présentent des risques spécifiques.

Propos recueillis par L. H.

D'après cette spécialiste de neuro-épigénétique, de nombreuses études tirent de fausses conclusions de l'observation de méthylation de l'ADN sur un ensemble de cellules. Elle peut avoir un effet sur l'expression de gènes de quelques pour cent, comme n'avoir aucun effet. Et, même si l'expression d'un gène est modifiée, cela n'a pas pour autant de conséquences pour la cellule.
Les ARN retiennent désormais toute l'attention pour expliquer la transmission des effets des traumatismes. « *Je pense que les preuves concernant les ARN non codants s'accumulent réellement* », confirme Bart Rutten, psychiatre spécialiste des interactions gènes-environnement et d'épigénétique à l'université de Maastricht (Pays-Bas). Ses travaux portent notamment sur les preuves de l'héritage transgénérationnel des traumatismes chez l'humain.
Chez les souris, les pères transmettent les altérations de l'épigénome par leur sperme. Plusieurs travaux ont mis en évidence que des micro-ARN présents dans les spermatozoïdes sont porteurs d'informations héréditaires. « *Des micro-ARN injectés dans les œufs fécondés de souris contrôles sont capables à eux seuls de reproduire chez les animaux provenant de ces œufs fécondés les phénotypes* [caractéristiques observables] *du père* », précise Valérie Grandjean, chercheuse à l'Inserm, qui a mené des travaux sur des souris obèses et diabétiques. Les modalités de la transmission maternelle ont été moins étudiées jusqu'à présent.
Il reste de plus beaucoup d'inconnues. On ignore notamment s'il existe d'autres facteurs potentiels que l'ARN, ou comment les altérations liées à l'ARN sont maintenues dans le temps (l'ARN étant peu stable), ou encore comment relier les modifications de l'épigénome aux symptômes observés chez les descendants. Et on ne sait pas ce qu'il en est chez l'humain. Pour l'heure, les scientifiques ont observé des méthylations de l'ADN consécutives à des traumas, notamment chez des anciens soldats atteints du trouble de stress post-traumatique. Des travaux en cours semblent confirmer la piste ARN. Mais la preuve définitive de la transmission — autre que culturelle — sur plusieurs générations reste à apporter. ■ **Léna Hespel**

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Ajuster son assiette pour affronter l'hiver

Afin de se prémunir contre les infections, il est important de mettre l'accent sur certains aliments qui renforcent le système immunitaire. Et d'éviter de manger trop gras.

Raclette, bœuf bourguignon, pot-au-feu… Avec le froid et le manque de lumière, nos envies diffèrent en période hivernale et nous aspirons souvent davantage à des plats consistants ou qui mijotent sur le feu. Mais la saison est aussi source d'infections et de baisse de moral. Il convient donc d'ajuster les menus en conséquence, en insistant sur certains aliments particulièrement bénéfiques durant cette période de l'année, tout en gardant une alimentation équilibrée. Cap sur les assiettes hivernales, à déguster bien au chaud.

38 471 tonnes

de raclette ont été vendues en France en 2022. Un peu moins (-5,5 %) qu'en 2021, quand, en post-pandémie, les ventes avaient bondi tout comme celles des appareils à raclette et fondue (+200 %).

(SOURCES : RANCE AGRIMER 2022, FNAC.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Certains aliments aident à se réchauffer

Lorsque notre corps est exposé au froid, il consomme plus de calories pour maintenir sa température interne autour de 37 °C, à travers la **thermogenèse**. Certains aliments peuvent même activer ce processus, tel le piment, grâce à la capsaïcine, son ingrédient actif (1). De même que le gingembre, qui contient du gingerol et le poivre noir, de la pipérine, deux ingrédients de la même famille que la capsaïcine (2). À noter que l'alcool n'aide pas à se réchauffer, malgré une sensation de chaleur liée à la dilatation des vaisseaux sanguins à la surface du corps. Car très vite, l'effet inverse se produit et la vasocons-

THERMOGENÈSE Production de chaleur de l'organisme par augmentation du métabolisme cellulaire. Elle est régulée par l'hypothalamus.

PASTEURISATION Procédé de traitement consistant à éliminer la plupart des micro-organismes du lait en le chauffant à une température comprise entre 60 et 90 °C.

PROVITAMINE A (OU BÊTACAROTÈNE) Pigment végétal de couleur orange présent dans certains fruits et légumes (carotte, potiron, mangue, etc.) et synthétisé en vitamine A par le foie.

triction des vaisseaux entraîne une perte de chaleur corporelle.

Continuer à bien s'hydrater

En hiver, le froid sec à l'extérieur, mais aussi les chauffages à l'intérieur des maisons sont très déshydratants. Il est donc important de boire suffisamment, d'autant que s'hydrater correctement préserverait le système cardiovasculaire et réduirait le risque d'insuffisance cardiaque (3). En plus de l'eau (1,5 l/jour), les boissons chaudes comme les tisanes, les infusions, le thé participent activement à l'hydratation, au même titre que les bouillons et les potages. Mais mieux vaut privilégier les soupes maison, également sources de minéraux, plutôt que des produits industriels qui contiennent plus de sel et de sucre — utilisé pour adoucir le goût et souvent caché sous la forme de sirop de glucose.

Doucement sur la raclette

Ce produit devenu star des soirées hivernales depuis le confinement est traditionnellement un fromage au lait de vache, qui se classe parmi les pâtes pressées non cuites, plus concentrées en nutriments. Le fromage à raclette fournit ainsi 630 mg de calcium pour 100 g, soit environ les deux tiers des apports journaliers recommandés pour un adulte. Il est aussi bien pourvu en protéines (22,9 g/100 g). On le choisit au lait cru ou thermisé (léger chauffage du lait), l'une des conditions pour obtenir l'indication géographique (IGP) « raclette de Savoie », ou encore au lait **pasteurisé**. Mais attention à ne pas en abuser, en raison de sa richesse en lipides (27,5 g/100 g), principalement des acides gras saturés. Compter 343 kcal pour 100 g, l'équivalent de cinq à six tranches, contre 232 kcal/100 g de fromage à fondue (4). Prudence avec les versions fumées parfois plus salées.

Pour renforcer l'immunité, des fruits et des légumes…

En hiver, l'organisme a autant besoin de fibres, de minéraux et de vitamines que le reste de l'année. Certains nutriments permettent par ailleurs de renforcer le système immunitaire, comme la vitamine E (2,4 mg/100 g d'épinards cuits, soit un quart des apports recommandés) qui entre dans la composition de la membrane des cellules immunitaires, et la vitamine C (deux kiwis couvrent 100 % des besoins d'un adulte), laquelle soutient notamment la migration des globules blancs vers les sites d'infection et la production d'anticorps (5). La provitamine A (8290 microgrammes de **bêtacarotène** pour 100 g de carottes râpées) aide à réguler le nombre et la fonction des cellules dites « natural killer » (NK), des globules blancs capables d'identifier les cellules infectées ou cancéreuses pour les détruire.

… des coquillages et des produits fermentés

Les boissons, les produits laitiers (kombucha, yaourt, croûtes de fromage, etc.) ainsi que les légumes fermentés (choucroute, kimchi, olives noires…) renferment des probiotiques, des bactéries ou des ferments lactiques tels que les lactobacilles et les bifidobactéries, qui contribuent à la régulation du système immunitaire (6). Les produits de la mer apportent aussi du zinc (21,8 mg/100 g d'huîtres), du sélénium (100 g de crabe fournissent plus de la moitié des apports journaliers recommandés), lesquels renforcent les défenses de l'organisme. 100 g d'huîtres couvrent aussi l'ensemble des besoins journaliers en cuivre, anti-infectieux et anti-inflammatoire. ■

Sylvie Boistard

PHILIPPE LEGRAND Directeur du Laboratoire de biochimie-nutrition humaine de l'Inrae, à Rennes

Inutile de manger plus gras en hiver

« Lorsque les températures sont au plus bas, nous avons tendance à croire qu'il faut manger davantage et plus gras pour maintenir notre température corporelle. Mais cela ne se justifie que si l'on travaille toute la journée au froid ou que l'on pratique une activité physique intense comme le ski. Pour le reste de la population, c'est inutile au risque de prendre du poids, notre confort de vie (chauffage, vêtements, transport) permettant aisément d'éviter les déperditions de chaleur. »

(1) The effects of hedonically acceptable red pepper doses on thermogenesis and appetite, Ludy M. J. et al., *Physiol Behav*, 2011.

(2) Metabolic effects of spices, teas, and caffeine, Westerterp-Plantenga M. et al., *Physiol Behav*, 2006.

(3) Middle age serum sodium levels in the upper part of normal range and risk of heart failure, Dmitrieva N. I. et al, *European Heart Journa*l, 2022.

(4) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(5) Vitamin C and immune function, Carr A. C. et al., *Nutrients*, 2017.

(6) Probiotics : effects on immunity, Isolauri E. et al, *The American Journal of Clinical Nutrition,* 2001.

PHOTO12/ALAMY/GEORG KRISTIANSEN

L'entrée de la grotte de Shanidar, en Irak, où a été retrouvé entre 1956 et 1961 le plus grand nombre de vestiges néandertaliens à ce jour. Les fouilles menées sur ce site ont contribué à défendre l'hypothèse de gestes funéraires chez cette espèce éteinte.

Révélation sur les funérailles chez Neandertal

Un mythe vacille. La « tombe aux fleurs » de la grotte de Shanidar, en Irak, l'une des plus célèbres sépultures néandertaliennes, est-elle vraiment la preuve du soin apporté aux défunts de notre proche cousin ? Les nouvelles fouilles reposent la question de l'origine de cet esthétisme funéraire.

Par Sara de Lacerda

Des néandertaliens auraient déposé un de leurs défunts sur un lit de fleurs. Voilà l'image poétique née à la fin des années 1960, dans l'ambiance « flower power », après la découverte d'amas de pollen près d'un corps dans la grotte de Shanidar, dans le Kurdistan irakien. Cet abri est un lieu majeur pour l'étude de notre proche cousin, puisqu'on y a retrouvé le plus grand nombre de squelettes néandertaliens à ce jour : 11 en tout. Mais de nouvelles fouilles conduisent aujourd'hui à reconsidérer cette thèse audacieuse : selon des chercheurs britanniques, ce pollen a plus vraisemblablement été déposé par des abeilles. Une conclusion qui ne remet nullement en cause la capacité de Neandertal à inhumer ses morts, même si cette idée peine encore à s'imposer. Car, malgré les éléments plus fiables fournis par les méthodes de fouilles modernes, à Shanidar comme sur d'autres sites préhistoriques, il reste difficile d'évaluer la diversité des gestes funéraires et de déterminer les intentions des anciens humains, néandertaliens comme *Homo sapiens*.

Pour bien comprendre ce qui se joue à Shanidar, commençons par un saut dans le passé. Lorsque l'archéologue américain Ralph Solecki (1917-2019) arrive en 1950 dans la vallée du Grand Zab, dans le nord de l'Irak, il est à la recherche d'un site de fouilles pour achever son doctorat. La population locale le guide vers cette imposante cavité, où les bergers abritent leurs troupeaux, depuis des millénaires sans doute. Ralph Solecki va y mener ▸

quatre campagnes entre 1956 et 1961 et excaver dix squelettes néandertaliens. Les chercheurs britanniques qui réexaminent le site ont découvert le onzième en 2015 et 2016, dès leur retour sur le terrain jusqu'alors inaccessible en raison des conflits dans la région. C'est la palynologue française Arlette Leroi-Gourhan (1913-2005), chargée par Ralph Solecki d'examiner les échantillons de pollen, qui évoque la première le dépôt de fleurs. Hypothèse audacieuse, confirmée par l'archéologue américain lorsqu'il publie en 1971 son livre consacré à Shanidar, *The First Flower People*. Naît ainsi l'image de la « tombe aux fleurs », laissant entendre que les néandertaliens qui vivaient il y a plus de 45 000 ans dans les monts Zagros auraient non seulement été capables d'empathie, mais auraient aussi eu le sens de l'esthétique et du soin apporté aux défunts.

Des erreurs commises et de nouvelles hypothèses

Une théorie qui a suscité bien des remous, *« car, à l'époque, on n'arrivait pas encore vraiment à imaginer une humanité différente de la nôtre »*, explique Vincent Lebreton, palynologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Maintes fois remise en question, elle n'a pourtant jamais été invalidée, jusqu'à ce qu'une nouvelle étude des pollens redessine l'image que l'on s'était forgée de la sépulture fleurie. En réexaminant les échantillons prélevés à l'époque, le paléoécologue Chris Hunt, de l'université John-Moores de Liverpool (Royaume-Uni), s'est aperçu qu'Arlette Leroi-Gourhan avait commis des erreurs en identifiant les espèces de fleurs : sur les cinq reconnues, seules deux sont aujourd'hui confirmées. C'est ensuite l'idée du bouquet qui est mise à mal, puisque les observations sur place montrent que les plantes identifiées ne fleurissent pas toutes à la même date autour de la grotte. Enfin, les agrégats sont composés d'un mélange de grains provenant d'espèces différentes, ce qui n'est pas compatible avec la présence de fleurs entières. Voilà les arguments publiés en 2023 dans le *Journal of Archaeological Science*.

En se rendant à Shanidar, Chris Hunt peut également mettre à l'épreuve — et réfuter — les explications envisagées par les chercheurs pour expliquer la présence de pollen sans dépôt de fleurs. L'hypothèse d'une contamination moderne par du pollen transporté sur les chaussures ou sur les mains n'est pas cohérente avec la forme des amas polliniques, *« aplatis et corrodés »*, signe de leur ancienneté. Le pollen n'a pas non plus été transporté par le vent, car il n'arrive pas jusqu'à l'emplacement de la sépulture, qui se situe à 16 mètres de l'entrée de la cavité. Enfin, le transport par un animal comme le mérione (*Meriones persicus*), un petit rongeur fouisseur, n'est pas non plus confirmé : si des terriers de petits mammifères sont bien attestés dans la grotte, rien ne dit qu'ils contiennent du pollen. Selon Chris Hunt, il ne reste qu'une possibilité pour expliquer la forme mixte des agrégats : les abeilles fouisseuses, car elles peuvent déposer du pollen provenant de plusieurs espèces lorsqu'elles sont en train de nidifier. La grotte compte en effet de nombreux nids, à la fois modernes et anciens, qui ont certainement échappé à Ralph Solecki, celui-ci ne bénéficiant pas du même éclairage.

Des corps déposés au même endroit à différentes époques

L'explication semble faire perdre une dose de poésie au site de Shanidar, mais elle est tout à fait plausible, confirme Vincent Lebreton : *« J'ai moi-même pu observer des abeilles fouisseuses sur le terrain, sur un site archéologique qui était peu propice à la conservation du pollen, et où dans quelques échantillons, j'avais des amas polliniques. Je me suis rendu compte qu'ils étaient apportés par ces abeilles. Mais c'était une contamination moderne, tandis que Chris Hunt ne conteste pas l'ancienneté des dépôts. »* Pour autant, la présence de végétaux, et même de fleurs, n'est pas complètement reniée, tempère le chercheur : *« Chris Hunt ne rejette pas totalement l'idée d'un apport intentionnel de fleurs. Il retient que certains groupes de pollens ne sont pas très matures dans les assemblages polliniques, ce qui pour-*

PÉRIODE

Au moustérien, une humanité s'affirme

Le moustérien est la culture principale du paléolithique moyen, qui s'est étendue dans toute l'Europe jusqu'en Asie centrale entre 350 000 et 40 000 avant notre ère. C'est le préhistorien français Gabriel de Mortillet (1821-1898), auteur de la nomenclature des périodes du paléolithique, qui forge ce terme en 1872 pour désigner l'industrie lithique découverte dans l'abri du Moustier, en Dordogne. Cette culture, qui succède à l'acheuléen, correspond à de nouveaux modes de production d'outils lithiques, de potentielles nouvelles pratiques de chasse, et peut-être même symboliques (utilisation d'ocre, sépultures). Elle ne se limite pas aux néandertaliens, mais caractérise également les premiers *Homo sapiens* (entre 100 000 et 35 000 avant notre ère) au Proche-Orient.

Reconstitution d'une scène de fleurissement de sépulture par des néandertaliens, illustrant l'hypothèse établie par les chercheurs après la découverte de pollen près des ossements du dénommé « Shanidar IV » (médaillon).

NMNH, SMITHSONIAN INSTITUTION, ARTIST KAREN CARR ; NATIONAL ANTHROPOLOGICAL ARCHIVES, SMITHSONIAN INSTITUTION

rait correspondre à une volonté intentionnelle de faire comme une litière sur laquelle on serait venu poser le corps. C'est intéressant, car cela n'enlève pas une dimension symbolique très forte autour de l'inhumation. Elle est juste un peu plus modérée par rapport à ce qu'avait voulu interpréter Arlette Leroi-Gourhan. »

Si l'on replace la thèse de la sépulture aux fleurs dans le contexte de la fin des années 1960, on comprend combien elle correspond aux années hippies. « *C'était la première fois qu'on pouvait faire cette proposition pour Neandertal, mais depuis, elle n'a jamais été reformulée* », commente Bruno Maureille, directeur du département des sciences archéologiques à l'université de Bordeaux. Elle a toutefois largement éclipsé la valeur réelle du site, bien plus complexe : « *Ce qui est certain,* poursuit le paléoanthropologue, *c'est qu'il y a eu à Shanidar des réinterventions des néandertaliens sur les squelettes des défunts, avec des positions très particulières de certaines pièces osseuses qui ne peuvent pas, selon moi, s'expliquer naturellement. Je pense donc qu'il y a eu des gestes funéraires nécessitant de réintervenir sur le squelette de certains défunts.* »

La sépulture aux fleurs fait par ailleurs partie d'un groupe d'individus que les chercheurs britanniques viennent de dater de 70 000 à 60 000 ans. Le fait que plusieurs corps semblent avoir été déposés au même endroit à différentes époques, près d'un très gros rocher, pourrait également fournir la preuve que ces néandertaliens avaient « *une mémoire topographique,* explique Bruno Maureille. *On peut tout à fait penser que Shanidar était une grotte qui, à la fois par sa localisation, sa visibilité dans le paysage, mais aussi sa topographie interne, était un point de repère pour les néandertaliens ; ce qui peut expliquer qu'ils y aient inhumé assez souvent certains de leurs morts.* » Ils auraient donc pu revenir pendant des générations à ce même endroit, situé au bord d'une gorge, sous une crête caractéristique, pour y déposer certains des leurs. Pour le paléoanthropologue bordelais, il est évident qu'il s'agit de dépôts intentionnels et non de morts acciden-

M. BESSOU, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

« Il est certain qu'il y a eu à Shanidar des réinterventions des néandertaliens sur les squelettes des défunts »

Bruno Maureille, directeur du département des sciences archéologiques à l'université de Bordeaux

CNRS

3 QUESTIONS À

FANNY BOCQUENTIN

ARCHÉOANTHROPOLOGUE AU CNRS

« Chaque sépulture est unique »

Quelles sont les plus anciennes sépultures humaines ?
Ce sont celles qui ont été découvertes sur le mont Carmel et en Galilée (Israël). Elles sont le fait de néandertaliens sur le site de Tabun, et d'hommes anatomiquement modernes à Qafzeh et Skhul, les deux populations ayant occupé ce même territoire durant le moustérien. On en dénombre une quinzaine avec certitude, dont certaines ont près de 120 000 ans. En Europe, les sépultures les plus anciennes ont environ 60 000 ans et sont le fait de Neandertal, car l'homme moderne n'avait pas encore peuplé ce territoire. Avant ces sépultures moustériennes, quelques découvertes d'accumulations de restes osseux beaucoup plus anciennes, comme à Sima de Los Huesos (Espagne), font débat.

Existe-t-il des similitudes entre les sépultures néandertaliennes et celles d'Homo sapiens ?
Parce qu'elles sont peu nombreuses, chaque sépulture est unique. On retrouve parfois des dépôts d'objets dans les tombes d'*Homo sapiens*, même parmi les plus anciennes. À Qafzeh et Skhul, deux des défunts *sapiens* étaient accompagnés d'ossements de grands mammifères (mâchoire de sanglier, massacre de cerf) positionnés contre ou au-dessus du thorax.

Y a-t-il d'autres exemples de tombes fleuries pendant la préhistoire ?
Un cas bien attesté est celui d'une sépulture double natoufienne (derniers chasseurs-cueilleurs du Proche Orient) découverte sur le site de Raqefet, daté d'environ 13 500 ans. Son fond portait encore les empreintes d'un lit de végétaux fleuris (menthe, sauge et scrofulaire, notamment). ■

Propos recueillis par S. de L.

telles. Ce qui correspond également aux recherches menées sur le site de La Chapelle-aux-Saints, en Corrèze : *« Après avoir retrouvé la fosse funéraire, nous avons proposé une interprétation qui, selon nous, valide l'existence d'une sépulture telle qu'elle a été décrite lors de la découverte de la grotte en 1908. »* Si la réévaluation de Shanidar est importante, c'est aussi parce que les sites moustériens *(lire l'encadré p. 76)*, fouillés dans des conditions qui relevaient plutôt de la destruction, peuvent à présent être documentés selon les normes modernes : *« On est aujourd'hui très attentif à lire les connexions ou dislocations articulaires, qui permettent d'affirmer si un corps s'est décomposé dans un espace funéraire aménagé, dans un contenant ou à même la terre »*, confie Fanny Bocquentin, archéoanthropologue au CNRS. En effet, poursuit-elle, *« le maintien des connexions articulaires évoque une protection du cadavre, dont la décomposition n'a pas été perturbée par un charognard. Mais prouver l'intentionnalité de cette protection requiert l'identification de gestes anthropiques. Le creusement d'une fosse, la présence de mobilier ou d'ocre, le regroupement de plusieurs individus, le positionnement soigné des corps, sont des indices de dépôts intentionnels. »*
Mais des indices seulement, car il n'existe pas vraiment de critères fixes pour déterminer si un dépôt est intentionnel ou non, souligne Antoine Balzeau, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle : *« Pour les sites anciens, on procède au cas par cas et en fonction des éléments dont on dispose. Si certains ont établi des listes des caractères attendus pour parler de sépulture, ces critères (comme la présence d'objets symboliques ou une position particulière du corps) ne fonctionneraient pas pour un ensemble de sépultures actuelles. Il n'est donc pas possible de faire de règle générale, il faut se contenter d'analyser de manière objective les données archéologiques. »*

S'en tenir aux preuves sans forcer l'interprétation

C'est ce que le chercheur a réalisé sur le site de La Ferrassie, en Dordogne, découvert dans les années 1970 : *« Nous avons réussi à trouver un ensemble de données géologiques, à faire des datations, des analyses ADN, protéomiques, et tout ce faisceau d'informations nous a permis de démontrer que la position du corps d'un individu n'était pas naturelle, que c'étaient forcément des humains qui l'avaient déposé. »* L'intentionnalité du dépôt ne signifie cependant rien de plus : *« C'est important, mais ça ne fait pas forcément avancer quant à la question de la finalité. Puisque l'on ne connaît pas l'état d'esprit des néandertaliens, on ne peut pas interpréter ce geste. On ne peut ici qu'en démontrer l'aspect volontaire. »* Voilà donc ce que nous apprend la relecture de la tombe aux fleurs de Shanidar : si l'on ne craignait pas autrefois de forcer les interprétations, les archéologues s'en tiennent désormais aux preuves les plus strictes. Pour l'heure, le reste est affaire de conviction. ■

Les lignes, ronds, points… gravés dans le bloc de schiste mis au jour près de Leuhan (Finistère) correspondent à la topographie des lieux environnants, soit un territoire de 30 km de long et 21 km de large.

La plus vieille carte d'un territoire en Europe

Cette dalle de schiste découverte dans un tumulus en Bretagne pourrait bien être la plus ancienne représentation cartographique connue, gravée il y a près de 4000 ans. Une équipe d'archéologues tente d'en percer les secrets.

L'histoire de la dalle de Saint-Bélec, dont des fouilles viennent de révéler de nouveaux fragments, pourrait sans aucun doute inspirer un roman d'aventures. Avant tout, parce qu'elle est un objet à part : elle pourrait bien être la plus vieille carte connue d'un territoire en Europe, gravée probablement à l'âge du bronze ancien, il y a près de 4000 ans, sur une imposante dalle de schiste de plus de 2 mètres de longueur et de 1,50 mètre de largeur. Ensuite, parce qu'après sa découverte en 1900 dans un tumulus situé près de Leuhan (Finistère), au nord-est de Quimper, par le préhistorien Paul du Chatellier, elle se volatilisa durant une bonne partie du XX^e^ siècle. Ou peut-être devrait-on plutôt dire qu'elle tomba dans l'oubli. Aussi, lorsque Yvan Pailler, professeur d'archéologie à l'université de Bretagne occidentale, et Clément Nicolas, chargé de recherche en archéologie au CNRS, tous deux spécialistes de la protohistoire, se décidèrent en 2011 à remettre la main dessus pour l'étudier, ils furent contraints de se lancer dans une véritable enquête.

DENIS GLICKSMAN, INRAP

« *Nous savions grâce à des archives que Paul du Chatellier avait organisé son transport dans son manoir de Kernuz, à Pont-l'Abbé, avant que son fils, après sa mort, ne la vende avec l'ensemble de sa collection au musée d'Archéologie nationale à Saint-Germain-en-Laye,* explique Clément Nicolas. *Mais lorsqu'en 2011, nous avons demandé à la voir pour l'étudier, on nous a répondu qu'elle était introuvable et qu'elle ne figurait donc pas dans les réserves.* » Après avoir interrogé, en vain, la totalité des archives et musées départementaux, les deux archéologues sont de plus en plus convaincus que la dalle de Saint-Bélec se trouve bien dans un recoin du musée. « *Clément s'est acharné à suivre cette piste et a eu raison de le faire,* raconte Yvan Pailler. *En 2014, nous avons découvert qu'un archéologue qui s'intéressait à une autre dalle de l'âge du bronze avait retrouvé sa trace des années auparavant dans les douves du château.* » Entre alors en scène l'un des gardiens du musée, qui se souvient d'avoir vu plusieurs dalles dans les caves. « *À partir de là, ce fut presque facile. Nous l'avons localisée dans l'obscurité et l'humidité des caves et, en 2017, nous avons pu faire appel à une entreprise spécialisée dans le levage de pierres pour la déplacer* », se remémore Clément Nicolas.

NICOLE PÉRON

« C'est un véritable jeu de piste que nous avons encore à mener, qui va sans doute nous occuper plusieurs années »

Clément Nicolas, chargé de recherche en archéologie au CNRS

Un réseau de parcelles, de reliefs et de cours d'eau

Les chercheurs peuvent enfin scruter de près cet étrange artefact. À sa surface, les fameuses formes géométriques et cupules (de petites dépressions circulaires gravées en creux) observées par Paul du Chatellier, qui semblent reliées entre elles par des lignes. « *Lorsqu'il est tombé face à cette dalle il y a plus d'un siècle en ouvrant la tombe, il a tout de suite senti que c'était une représentation hors du commun, d'un style jamais décrit pour la Bretagne. Il n'a pas su comment l'interpréter* », détaille Yvan Pailler. Voici ce qu'écrira Paul du Chatellier dans ses notes : « *Décrire ce curieux monument avec ses cupules, ses cercles et ses diverses figurations gravées, dans lesquelles certains voient une représentation humaine informe et celle d'une bête, est chose difficile. […] Ne nous laissons pas égarer par la fantaisie, laissant le soin à un Champollion, qui se trouvera peut-être un jour, de nous en donner la lecture.* »
Il faut croire que la dalle de Saint-Bélec n'attendait pas un, mais deux Champollion. En 2021, Clément Nicolas et Yvan Pailler formulent enfin dans une publication leur hypothèse : pour eux,

FOUILLES

Les mystères du tumulus restent entiers

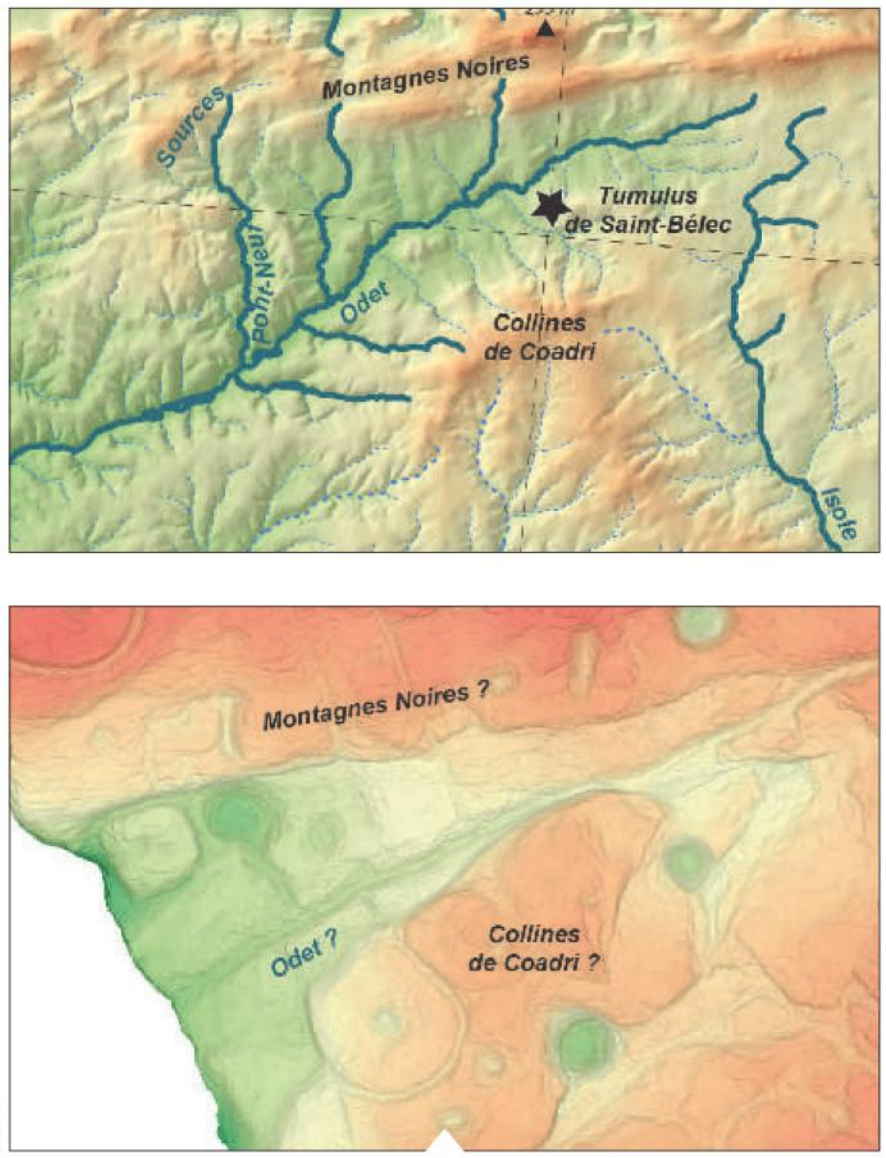
Avec ses dimensions de près de 4 mètres de longueur, 2 mètres de largeur et 2 mètres de profondeur, le tumulus de Saint-Bélec est singulièrement grand pour cette période de l'âge du bronze ancien. Le défunt y fut inhumé dans un caveau en pierre, construit au centre de la fosse. La pierre gravée, elle, constituait l'un des petits côtés du coffre, lui-même recouvert d'une grosse dalle que Paul du Chatellier, en 1900, explosa à coups de masse pour pouvoir accéder à la tombe. Malheureusement, le caveau n'a pas livré un mobilier très riche : seuls un vase biconique décoré de chevrons, un probable poignard en bronze et des pointes de flèches en silex y ont été retrouvés.

FRED TANNEAU / AFP

Des morceaux de poignard et trois pointes de flèches armoricaines ont été découverts dans le tumulus de Saint-Bélec lors des dernières fouilles, à l'automne 2023.

ces motifs seraient un réseau de chemins, d'enceintes, de parcelles, de reliefs et de cours d'eau. En somme, ils correspondraient à l'une des toutes premières représentations cartographiques de l'humanité. « *En réalité, c'est le préhistorien Jacques Briard qui a fait le premier, en 1994, l'analogie entre la dalle et des gravures rappelant des parcellaires connus dans les Alpes, ou en tout cas des sites à gravures publiés comme étant des cartes, comme celle de Bedolina, en Italie,* nuance Clément Nicolas. *Mais il n'ira pas plus loin.* » Trois éléments en particulier poussent le duo à creuser cette piste : sur la partie gauche de la dalle, un grand triangle creusé en bas-relief, une barrière rectiligne et un petit relief correspondent parfaitement à la vallée de l'Odet (un fleuve côtier qui s'écoule en contrebas du tumulus), à la ligne de crête des Montagnes noires et au massif granitique tabulaire tels qu'on peut les admirer lorsque l'on se place au-dessus du tumulus. Bien entendu, l'observation seule ne suffit pas. Une analyse statistique leur a ensuite permis de confirmer leur intuition : avec un niveau de confiance de 80 %, ils parviennent à établir des correspondances avec les cartes IGN actuelles, et même pour la première fois à calculer l'étendue de l'espace figuré sur la dalle. « *En l'occurrence, un territoire de 30 par 21 kilomètres* », précise Yvan Pailler.

Clément Nicolas et Yvan Pailler ont encore un autre argument pour renforcer cette thèse de la représentation cartographique : le contenu du tumulus lui-même *(lire l'encadré ci-contre)*, qui laisse penser que le défunt qui y était inhumé était un personnage de haut rang. « *La société à cette époque était très hiérarchisée, ce qui se reflète parfaitement dans les tombes, qui vont de simples fosses creusées dans la terre sans aucun objet funéraire à de grands tumulus faits de dalles emboîtées,* affirme Clément Nicolas. *On trouve presque toujours dans ces derniers des objets en bronze comme des poignards ou des haches, ou encore des pointes de flèche en silex finement taillées, insignes du pouvoir par excellence.* » Paul du Chatellier ne rapporta du tumulus de Saint-Bélec que l'énorme dalle gravée. Mais là encore, Clément Nicolas et Yvan Pailler ont eu raison de suivre leur flair. Entre la fin de l'année 2022 et l'automne 2023, ils décident de refouiller le tumulus pour vérifier que leur prédécesseur n'y avait rien oublié. Ils y retrouvent non seulement des fragments manquants de la fameuse dalle, des tessons de poterie, mais surtout des morceaux de poignard et trois pointes de flèches armoricaines, l'apanage des rois de la région à cette époque.



INRAP

Situé à Leuhan dans la vallée de l'Odet, entre les Montagnes noires et les collines de Coadri (en haut), le tumulus de Saint-Bélec est loin d'être le seul dans le Finistère, où des structures similaires ont été trouvées. En bas, une comparaison entre la dalle gravée et la topographie du secteur. Les lignes et cupules correspondent aux motifs présents sur le bloc de schiste.

BRUNO BOURGEOIS

Une véritable « carte aux trésors »

« *Ces tombes d'élites ou tombes princières sont distribuées de façon assez régulière dans l'espace breton, soit tous les 15-25 kilomètres. On peut imaginer qu'elles se trouvaient au centre des territoires d'entités politiques de l'époque. D'où l'idée que la dalle de Saint-Bélec puisse figurer la carte d'un de ces royaumes anciens, enterrée avec l'un de ses souverains* », suppose Yvan Pailler. En toile de fond se pose une question plus large : et si le niveau d'organisation de ces sociétés avait été sous-estimé ? « *Entre la paix qui règne à cette époque et le développement des tout premiers réseaux viaires, les ingrédients sont en tout cas réunis pour voir émerger de vrais proto-États. Dans cette perspective, la dalle prend tout son sens.* »

Reste pour les deux archéologues à percer véritablement les secrets des symboles de cette carte. « *Une nouvelle phase du travail s'ouvre pour nous, qui va sans doute nous occuper pendant plusieurs années. C'est un véritable jeu de piste que nous avons à mener* », s'enthousiasme Clément Nicolas. D'autant qu'ils en sont encore une fois persuadés l'un comme l'autre : la dalle de Saint-Bélec est une « *carte aux trésors* ». Un document précieux qui les conduira à d'autres merveilles archéologiques encore enfouies. ■ **Marine Benoit**

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 82

▶ C'est à voir
p. 84

▶ Le ciel du mois
p. 85

▶ Chroniques
p. 86

▶ Jeux
p. 88

▶ Solutions des jeux
p. 89

▶ Questions de lecteurs
p. 90

CHRISTOPHE COURTEAU/NATURAGENCY

L'hémoglobine d'« Arenicola marina » a une forte capacité oxygénante, a découvert Franck Zal.

Un ver champion de l'apnée

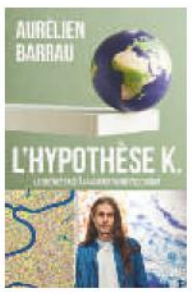
Le biologiste Franck Zal raconte sa découverte des étonnantes vertus d'un ver marin, mais aussi le parcours d'un chercheur objet de jalousies et d'espionnage.

OXYGÈNE C'est l'histoire d'une énorme avancée scientifique et de la vie d'un homme que rien ne semblait prédestiner à cette réussite. Mère tunisienne, père polonais chef de chantier, fratrie nombreuse : Franck Zal, ovni dans une famille où il sera le premier à obtenir le bac, est docteur en biologie marine, découvreur des propriétés extraordinaires de l'hémoglobine des vers marins. *Arenicola marina*, ou *buzuk* pour les Bretons, est un champion de l'apnée. De cette espèce abondante sur l'estran de la station biologique CNRS de Roscoff (Finistère) au sein de laquelle il travaillait, le scientifique a tiré une molécule désignée par le code M101. Cette hémoglobine marine qui fixe 40 fois plus d'oxygène que l'hémoglobine humaine, s'est avérée être un formidable transporteur d'oxygène universel.

Depuis sa mise au point en 2007, lorsque le chercheur quitte le CNRS pour créer sa start-up, Hemarina, jusqu'à l'autorisation de mise sur le marché en 2022, M101 a été employée avec succès, notamment pour oxygéner plus durablement les greffons avant les transplantations, ou pour favoriser la cicatrisation en cas de grandes brûlures. Ce récit de vie articulé autour de chapitres de vulgarisation scientifique révèle aussi le parcours d'un chercheur objet de jalousies et d'espionnage, reconnaissant à l'égard de l'institution et de ses mentors, mais critiquant un système fondé sur la séparation entre recherche fondamentale et appliquée, dominé par la politique, et par un principe de précaution qui freine l'innovation. Des points de vue que Franck Zal assume en affirmant son désir d'être utile à la société. ■ **Andreina De Bei**

Un trésor sous le sable, Franck Zal, avec Elena Sender et Robert Thibierge, Les Arènes, 247 p., 21 €

Sortir de l'ornière



PLAIDOYER Dans cet essai stimulant, l'astrophysicien Aurélien Barrau, très engagé dans la lutte contre la catastrophe climatique et écologique, pose une question presque provocante : et si nous envisagions la science tout autrement ? À savoir différemment de l'approche *« ingénierique »* en usage, avec ses machines et algorithmes tout-puissants. Et d'aller ainsi à contre-courant de cette prolifération technique exponentielle qui ne résout rien mais tendrait plutôt à apporter de nouveaux problèmes. En sorte, rendre à la science sa capacité subversive. **H. R.**

L'Hypothèse K, Aurélien Barrau, Grasset, 220 p., 18 €

Errances alimentaires

IMPACTS Ce livre retrace l'histoire de l'humanité à travers l'évolution de nos systèmes alimentaires, de la période des chasseurs-cueilleurs à l'essor de l'agrobusiness. L'auteur, ancien chroniqueur culinaire du *New York Times*, avance l'hypothèse que la quête incessante de nourriture a été le principal moteur de l'évolution de nos sociétés. Mais ce développement se fait au détriment de notre planète, et mieux s'alimenter contribuerait à façonner un avenir meilleur pour l'humanité, démontre-t-il avec de solides arguments. **I. D. O'G.**

L'Histoire aberrante de l'alimentation, Mark Bittman, Actes Sud, 24 €

L'histoire au long cours

RÉPERTOIRE C'est maintenant qu'il existe qu'on réalise à quel point cet ouvrage comble un vide en matière d'archéologie. À travers un riche ensemble de cartes, ses deux auteurs, pontes de l'Institut national de recherches archéologique préventives (Inrap), nous embarquent dans un grand voyage dans le temps sans jamais nous faire quitter le sol français. Y sont passés en revue, de la préhistoire aux guerres mondiales, le moindre objet, pan de mur, reste de repas ou reste humain mis au jour sur notre territoire et racontant notre histoire sur un million d'années. **M. B.**

Atlas archéologique de la France, Dominique Garcia et Marc Bouiron, Tallandier, 336 p., 36 €

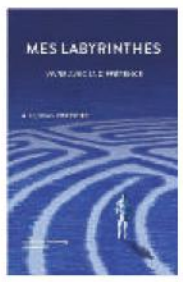
Quand la défiance a du bon

SENS CRITIQUE Le doute pour toutes et pour tous ! Voici l'une des lignes fortes de cet ouvrage percutant qui analyse le caractère de l'expertise scientifique — dont il faudrait repenser les modalités — et les relations entre sciences, société, pouvoir politique, ébranlés par les scandales et la vitesse de circulation des informations ainsi que par les inéluctables *fake news*. Le constat d'une méfiance croissante envers les sciences, suscitée notamment par la crise climatique et la pandémie de Covid-19, a mené les auteurs à affirmer la nécessité de s'extraire d'un affrontement stérile entre *« complotistes »* et *« gardiens du savoir »*, *« crédules »* et *« experts »*, et à suggérer plutôt la pratique de la défiance. Essentielle en démocratie, cette façon d'exercer son sens critique garantit le pluralisme et la restauration d'un débat réellement collectif. Il s'agit en outre ici d'un vibrant appel à forger une autre vision de la recherche, fondée sur une expérimentation ouverte et sur la sobriété face aux surenchères technologiques. ■ **A. De B.**

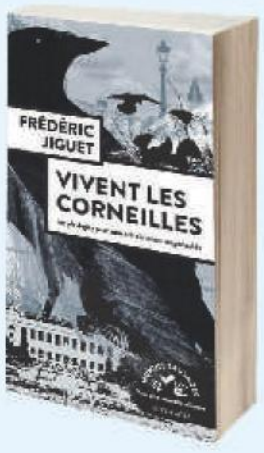
Les Sciences dans la mêlée. Pour une culture de la défiance, Bernadette Bensaude-Vincent et Gabriel Dorthe, Seuil, 254 p., 22,50 €

Des mots sur les maux

AUTISME Diagnostiqué autiste à 25 ans, ce docteur en philosophie convoque un art de la narration pour partager son ressenti. Ce récit, à la fois essai littéraire poétique et point sur les neurodiversités, nous transporte, non sans émotion, dans l'intimité de cette introspection qui révèle ses joies, ses forces et ses vulnérabilités. En particulier, ces crises qui surviennent lorsque l'émotion le submerge, se traduisant par des cris irrépressibles. Une lecture immersive éclairante pour mieux comprendre ce que signifie se sentir prisonnier de son propre esprit. **P. P.**



Mes labyrinthes, vivre avec la différence, Florian Forestier, Éditions du Faubourg, 208 p., 18 €



Changer de regard sur les corneilles

COHABITATION Printemps 2015. Frédéric Jiguet, ornithologue au Muséum national d'histoire naturelle, se voit confier par la mairie de Paris une mission d'étude des corvidés (corbeaux, corneilles et pies) de la capitale, coupables de *« nuisances récurrentes »* : saccages de poubelles, arrachages de plantes et de pelouses, attaques de passants. L'objectif de ce projet : *« rendre possible une cohabitation apaisée »* entre ces oiseaux et nous. Premiers baguages, suivi de leurs déplacements, identification de leurs lieux d'alimentation, évaluation de leur rôle dans la gestion de nos déchets alimentaires, etc. : on découvre tout du travail de terrain mis en place par le chercheur et son équipe pour accroître nos connaissances sur les corvidés. Un livre à la dimension pédagogique indéniable : impossible, après l'avoir lu, de continuer à considérer ces acteurs majeurs de la vie sauvage urbaine uniquement comme des nuisances. ■

Vincent Glavieux

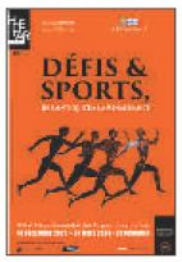
Vivent les corneilles, Frédéric Jiguet, Actes Sud, 176 p., 21 €

C'EST À VOIR

EXPOSITIONS

Arc-et-Senans (25)

Notre-Dame de Paris : l'exposition augmentée
De 1163 au chantier de restauration de la cathédrale, ce parcours dévoilé en 2022 au collège des Bernardins à Paris se déroule une tablette à la main. Des modélisations 3D reconstituent à la fois les lieux à travers les siècles et des scènes historiques. Lire notre article : sciav.fr/904notre-dame
Saline royale, Grande-Rue, jusqu'au 15 avril. Rens. : 03.81.54.45.00.



Draguignan (83)

Défis et sports, de l'Antiquité à la Renaissance
L'exposition commence par l'olympisme pour élargir son propos à la pratique sportive, allant de la mythologie grecque aux tournois de chevaliers. Parmi les 160 œuvres et objets, des pièces de Buffet ou Degas.
Hôtel départemental des expositions du Var, 1, boulevard Maréchal-Foch, jusqu'au 24 mars. Rens. : 04.83.95.34.08.

Elbeuf-sur-Seine (76)

Voyage à contre-courant
Cartes, maquettes… montrent comment un fleuve peut s'apparenter à un organisme. Au fil de l'eau, la biodiversité côtoie l'activité humaine et les paysages se modifient.
La Fabrique des savoirs, 7, cours Gambetta, jusqu'au 2 juin. Rens. : 02.32.96.30. 40.

Paris (75)

Objectif mer : l'océan filmé
Cette première exposition du musée récemment rouvert *(lire* S. et A. *n° 922)* parle de la mer au cinéma. Évoquant les premiers films qui montrent les fonds marins et le matériel conçu pour ces tournages, elle se tourne surtout vers les visions de la fiction.
Musée national de la marine, palais de Chaillot, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 5 mai. Rens. : 01.53.65.69.48.

Cloche à plongeur en verre et bois, 1814 (modèle). ◀

FRANCK BOTTÉ MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS-CNAM

Paris (75) / Exposition

Explorer l'infiniment…

Partir en quête de l'inaccessible, le découvrir, le comprendre. C'est ce qui unit dans une même exposition l'explorateur de l'Antarctique Jean-Baptiste Charcot (1867-1936) et cette particule élémentaire qu'est le neutrino. Entre horizons lointains et physique de la matière, le visiteur a droit à cinq visions de la science des extrêmes. Outre les Pôles et les particules, *« l'infiniment profond correspond aux abysses*, détaille Denis Savoie, astronome et conseiller scientifique. *Nous proposons au visiteur une manipulation qui le place dans un ascenseur pour le faire aller du niveau 0 jusque dans la fosse des Mariannes, à environ 11 km sous le niveau de la mer. Il y verra que les abysses sont habités : il y a des poissons, des sources hydrothermales, cela grouille de vie. »* Les deux derniers volets du parcours sont dédiés aux mondes anciens, au passé de la Terre et à l'archéologie, puis à l'astronomie. *« Pendant longtemps, l'exploration de l'espace s'est faite à distance avec des télescopes, des lunettes. Maintenant, on a des rovers et demain, ce seront principalement des robots. »* ■

Sarah Boulvard et Arnaud Devillard

Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 12 mai. Rens. : 01.53.01.82.63.

Saint-Nazaire (44)

Power up
Mêlant art, architecture et histoire de Saint-Nazaire, cette exposition questionne le mythe de la grande infrastructure à l'heure des crises énergétique et climatique. Un parcours utopique qui revient sur des projets techniques jamais réalisés.
Le Grand Café, 2, place des Quatre-Z'Horloges, du 9 février au 12 mai. Rens. : 02.44.73.44.00.

Toulouse (31)

Unseen Apollo
En six voyages sur la Lune, les 12 astronautes des missions Apollo ont pris pas moins de 13 887 photographies ! Le photographe Jef Bonifacino a sélectionné celles jugées anecdotiques ou qui comportent des défauts, renouvelant la capacité d'émerveillement.
Cité de l'espace, avenue Jean-Gonord, jusqu'au 7 juillet. Rens. : 05.67.22.23.24.

PARTENARIATS

SCIENCES AVENIR La Recherche

Documentaires

Vivre avec les loups
S'il n'oublie pas de replonger le spectateur dans cette nature sauvage qu'il aime tant, le réalisateur Jean-Michel Bertrand offre une réflexion profonde sur la nécessaire bonne cohabitation avec ce grand prédateur.
Lire notre article : sciav.fr/924loups
Sortie en salles le 24 janvier.

La ferme des Bertrand
Avec des images tournées en 1972, 1997 et 2022, le réalisateur Gilles Perret évoque l'histoire d'une exploitation laitière en Haute-Savoie et retrace aussi l'évolution du monde paysan au travers de ce portrait familial sur trois générations.
Lire notre article : sciav.fr/924ferme
Sortie en salles le 31 janvier.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL DE FÉVRIER

PAR JOHAN KIEKEN

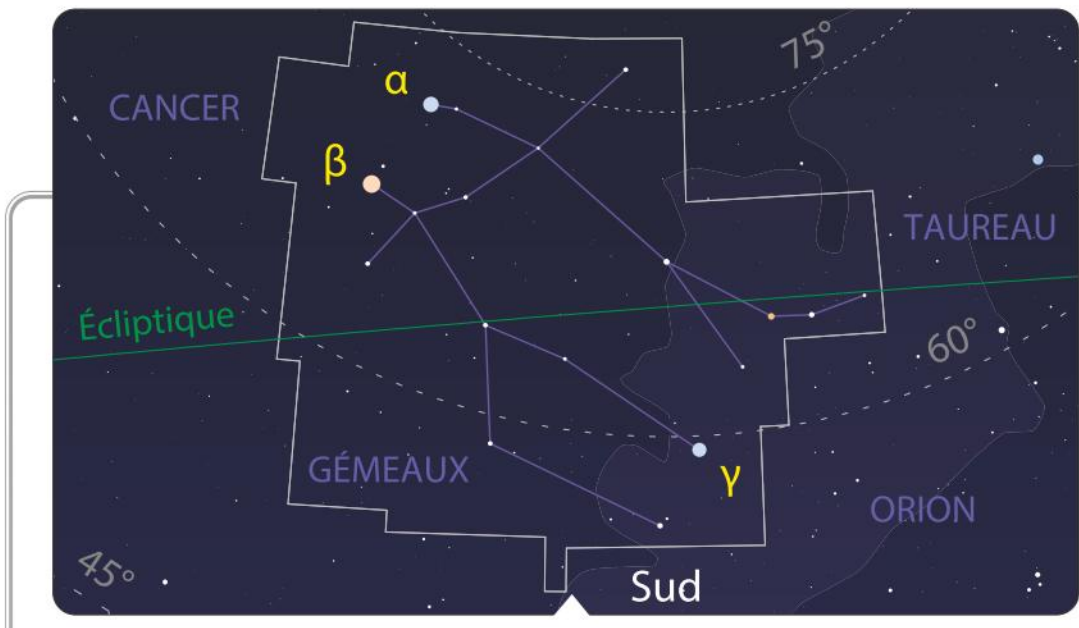
Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète n'est pas visible ce mois, beaucoup trop basse dans les lumières du levant. Elle passera en conjonction supérieure le 28.

VÉNUS L'étoile du Berger est visible le matin sous la forme d'un point très brillant juste au-dessus de l'horizon sud-est. Le 1er, elle se lève 1 h 40 min avant le Soleil mais ne le fait que 50 minutes avant lui le 29.

MARS La planète Rouge s'éloigne peu à peu de la direction du Soleil, mais son éclat est encore trop faible pour qu'elle soit facilement accessible à l'œil nu le matin. Elle sera proche de Vénus (moins de 1°) du 21 au 23, ce qui peut permettre sa détection éventuelle aux jumelles.

JUPITER La plus massive des planètes est observable dès la tombée du jour et jusqu'à minuit environ. Elle domine alors en éclat, et de très loin, tous les autres astres. Jupiter est immanquable en soirée. Elle occupe la constellation du Bélier depuis mai 2023 et ne la quittera qu'en avril pour entrer dans le Taureau.



Les Gémeaux culminent vers 22 h en ce mois de février.

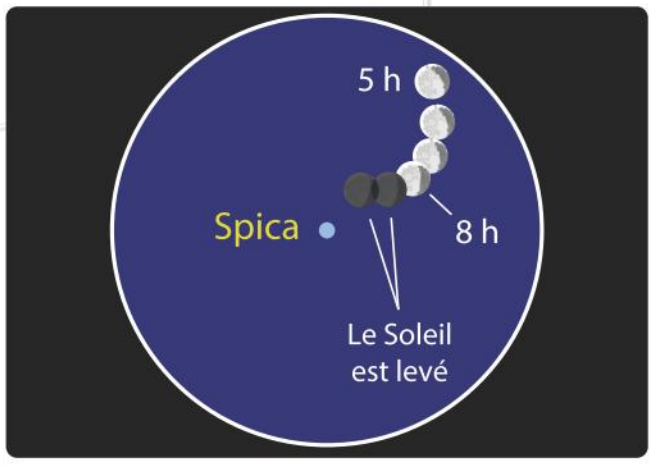
Les jumeaux du ciel

ON REPÈRE LES GÉMEAUX au premier coup d'œil grâce à leurs deux étoiles principales α (Castor) et β (Pollux), la plus brillante des deux. Alhena (γ) arrive en troisième position par son éclat. Constellation du zodiaque, les Gémeaux reçoivent périodiquement la visite de la Lune, des planètes et du Soleil, qui les traverse entre le 21 juin et le 21 juillet environ.

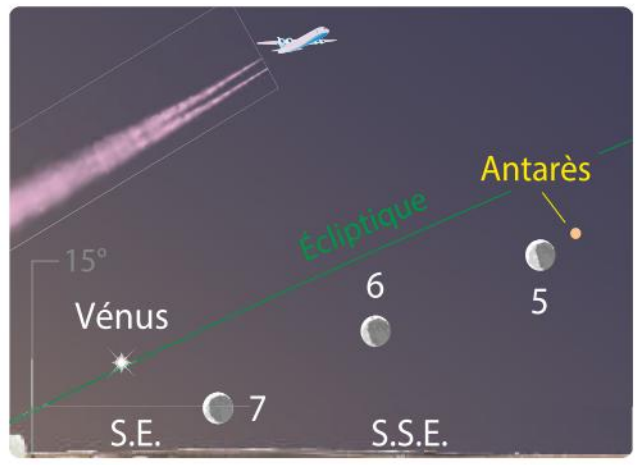
Notre conseil Les Gémeaux se trouvent dans des conditions idéales d'observation, visibles dès la tombée de la nuit. Castor et Pollux sont observables jusqu'au cœur des grandes villes.

SATURNE La planète aux anneaux est visible en début de mois vers le couchant, avant d'être rattrapée (en direction) par le Soleil. Elle passera d'ailleurs en conjonction avec notre étoile le 28.

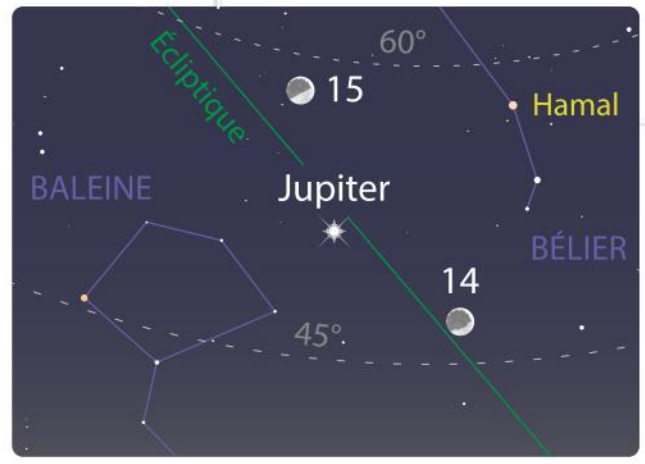
JAMES WEBB SPACE TELESCOPE est une application gratuite en anglais pour Android. Elle communique des informations générales sur le télescope spatial James-Webb et propose, sous la forme d'une mosaïque d'images, les toutes dernières photographies envoyées par le célèbre télescope. Chaque image, cliquable, est ensuite éclairée par un commentaire.



LE MATIN DU 1ER FÉVRIER, SUIVEZ AUX JUMELLES le joli rapprochement entre la Lune gibbeuse et l'étoile de première grandeur Spica, dans la constellation de la Vierge.



DU 5 AU 7, 30 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL, le fin croissant de Lune rend visite à l'étoile Antarès du Scorpion, puis à la planète Vénus. Horizon dégagé indispensable !



LES SOIRS DU 14 ET DU 15, 1 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, tournez-vous vers le sud-ouest : à bonne hauteur, vous verrez le premier quartier de Lune et la planète Jupiter.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de février

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

L'urgence de s'adapter à la montée de la mer

La hausse du niveau de la mer s'accélère de décennie en décennie. Environ 4 mm par an aujourd'hui en moyenne globale, soit trois fois plus vite qu'au début du XXe siècle. En atteignant la neutralité carbone, il est possible de stabiliser la température planétaire et les événements extrêmes associés ; pas le niveau de la mer. Il continuera à grimper sur des millénaires car les calottes polaires et les glaciers de montagne s'ajustent lentement au réchauffement et poursuivront leur fonte. Les effets de la montée des eaux sont déjà marqués avec des inondations chroniques à marée haute des terres les plus basses, des submersions marines de plus grande ampleur et de plus en plus destructrices lors de tempêtes et de cyclones, des salinisations de nappes phréatiques côtières, etc. Ce n'est que le début ! +30 cm attendus en 2050 par rapport à aujourd'hui tandis qu'ensuite, le rythme de la hausse dépend de nos émissions de CO_2 à la fois présentes et futures. Mais nous ne maîtrisons pas tout. Nous savons que chaque dixième de degré supplémentaire de réchauffement nous rapproche d'un possible effondrement des calottes polaires, qui conduirait à une hausse d'environ 1,7 m en 2100, entre 4 et 5 m en 2150. C'est demain. Considérer ces éventualités est indispensable pour la gestion des risques, en particulier pour les infrastructures critiques aux durées de vie et d'implémentation pluridécennales (centrales nucléaires, zones portuaires et urbaines, etc.). L'adaptation face à l'irréversibilité relève de l'urgence, car du temps est nécessaire pour organiser la protection et la relocalisation des sites, et éviter la construction de digues ou d'enrochements qui, *in fine*, peuvent accentuer les vulnérabilités. Nous n'avons pas le choix. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHÉMATIQUES PAR CLAIRE MATHIEU

Le mieux est l'ennemi du bien

Se garer en ville peut être un cauchemar. Combien de places de parking faut-il ? Comme elles occupent un espace précieux, on pourrait penser qu'idéalement il devrait y en avoir juste ce qu'il faut. Mais avec un taux d'occupation de 99 %, un conducteur devra passer une cinquantaine d'emplacements avant de trouver une place libre, d'où une perte de temps. De plus, à tout instant, une partie des voitures qui circulent ont pour but, non d'aller quelque part, mais de trouver une place de parking ! Or, si le taux d'occupation passe de 99 % à 98 %, il faut deux fois moins de temps pour trouver une place ! En 2006, l'urbaniste américain Donald Shoup a montré que le bon taux d'occupation était d'environ 7/8. Pour y arriver, il suffit d'augmenter le prix du parking pour décourager certains de venir en voiture, jusqu'à avoir le taux d'occupation désiré. L'idée qu'un remplissage parfait est en réalité moins qu'idéal s'applique à bien d'autres circonstances. Quiconque a déjà saturé son agenda s'est rendu compte qu'il est alors bloqué et que les nouvelles demandes de tâches doivent attendre longtemps. Pour pouvoir répondre rapidement aux requêtes, il faut conserver une certaine fraction de trous dans son emploi du temps : cette inefficacité apparente permettra d'être en réalité plus efficace ! Une optimisation algorithmique à outrance qui s'attacherait à tout remplir ferait donc fausse route. Optimiser un seul facteur nuit souvent à l'efficacité. ■

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Se prémunir contre les risques ne protège pas de tous les dangers…

En décembre 2023, après plusieurs mois d'âpres négociations, les États membres de l'Union européenne se sont mis d'accord avec le Parlement européen sur une régulation juridique des systèmes d'intelligence artificielle, le AI-act. Ce dernier se fonde sur une pyramide des risques comprenant quatre niveaux relatifs aux technologies mises en œuvre et à leurs usages : les risques inadmissibles débouchant sur des interdictions strictes ; les risques élevés pour lesquels on impose des contrôles très sévères ; les risques modérés qui exigent une totale transparence ; et enfin les risques faibles pour lesquels on demande juste d'informer le consommateur. Ce règlement vise à protéger les citoyens contre les dérives autoritaires. L'Europe souhaite garantir l'exercice de la démocratie. Comment ne pas louer une telle intention. Le principe est admirable. On doit s'en féliciter, même si les risques recensés ne correspondent pas toujours à de réels dangers, et si certaines applications ne font l'objet d'aucune précaution particulière, comme l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les jeux vidéo, alors qu'elles peuvent être responsables de nouvelles formes d'accoutumance. De plus, à force d'œuvrer à l'élimination de tous les risques, dont certains sont plus ou moins imaginaires, on paralysera à coup sûr l'industrie européenne en la noyant sous des exigences trop coûteuses à satisfaire. Insistons : le mot « risque » désigne l'éventualité d'un danger ; l'étymologie renvoie au verbe latin *resecare*, couper. Les couteaux coupent… ce qui est fort utile, même s'ils peuvent tuer. On ne les interdit pas pour autant ; mais on réglemente leur port afin de limiter les chances de mésusage. Pour l'intelligence artificielle, il devrait en aller de même : ce qui importe, plus que le risque, c'est la réalité du danger. « Danger » vient de domination ; être en danger, c'est être à la merci de quelqu'un ou de quelque chose. Or, en voulant se prémunir de tous les risques, c'est-à-dire de toutes les éventualités que l'on a prévues, on s'expose à l'imprévu ! Et, l'innovation technologique est par essence imprévisible… ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

L'accord de la 28e conférence sur le climat de l'ONU, adopté le 13 décembre à Dubaï par consensus, a été salué par de longs applaudissements et une ovation debout. Mérite-t-il le qualificatif d'*« historique »* dont l'ont habillé de nombreux politiques ? Beaucoup de climatologues ne le pensent pas, le texte final n'appelant pas directement à la « sortie » des énergies fossiles, pétrole, gaz et charbon, les principaux responsables du réchauffement climatique. Pour une centaine de pays et des milliers d'ONG, la COP28 est une déception. **O. L.**

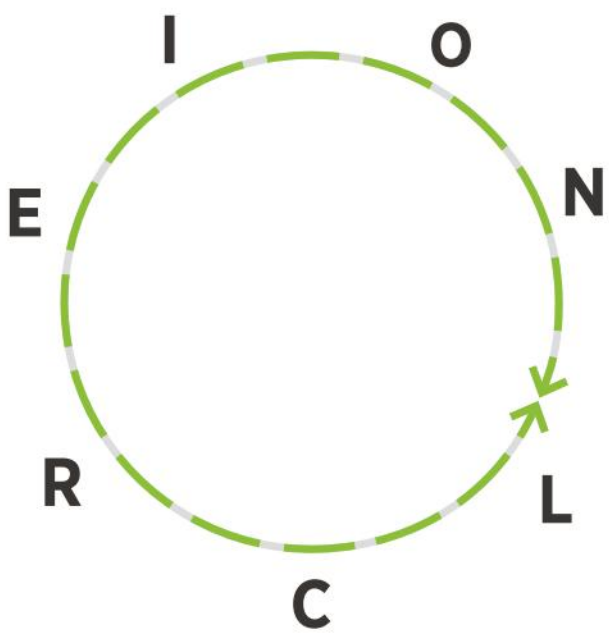
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour exciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

À cloche-lettre

Quel mot saurez-vous lire sur ce cercle en sautant « à cloche-lettre », de 2 en 2, ou de 3 en 3, ou autre, dans un sens de votre choix ?



De la France à l'Écosse

Passer de France à Écosse avec 3 mots de 6 lettres intermédiaires.

- Chaque mot diffère du précédent en modifiant une seule lettre.
- À chaque étape, les lettres peuvent changer de place.
- Toutes les formes grammaticales sont autorisées, mais les noms propres sont exclus.

F	R	A	N	C	E
E	C	O	S	S	E

20 dans l'ordre !

Avec les nombres 1 2 3 4 5 6 7 8 9 dans cet ordre, les 4 opérations et les parenthèses, exprimez exactement 20.

Multiplication pour lettrés

Remplacez chaque lettre par un même chiffre pour rendre vraie cette multiplication :

```
  C I N Q
X     S I X
---------
= B I L L E S
```

Carré géodésique

Trouvez l'altitude de chaque case, de 1 à 9.

- Dans chaque case et chaque colonne, les altitudes sont toutes différentes.
- Les cases bleues (creux) sont d'altitude moindre que toutes les cases voisines de droite, gauche, haut et bas.
- Les cases rouges (pics) ont une altitude supérieure à leurs voisines de droite, gauche, haut et bas.
- Les voisinages diagonaux ne comptent pas.
- Les cases blanches voisinent avec des plus hautes et des plus basses.

			4					
	2				8			
		8			2			
			2					
							8	
	8					2		
	3						7	
3								

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 923, janvier 2024

0 1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12

0 = -3+4+5-6 ;
1 = 3x4-5-6 ;
2 = -3+4-5+6 ;
3 = -3-(4-5)x6 ;
4 = 34-5x6 ;
5 ne fait pas partie de l'énoncé
6 = 3+4+5-6 ;
7 = (-3+45)/6 ;
8 = (3+45)/6 ;
9 = -3x(4-5)+6 ;
10 = 3-4+5+6 ;
11 = 3x4+5-6 ;
12 = -3+4+5+6

Domino, domino...

6 : 4 (la somme des points de chaque double a son équivalent, 1 : 1 et 0 : 2, 3 : 3 et 5 : 1, et donc 6 : 4 pour 5 : 5).

Einstein en rouge

La troisième apparition de chaque lettre est rouge.

Carré (presque) logique

P et R de la deuxième colonne doivent être inversés (séquence PQRS lue de haut en bas et de gauche à droite).

Carré latin

			14			30	12				19	9
			45	23	45	6	9	38	23	45	16	30
14	8	13	6	3	5	0	1	8	9	7	4	2
18	1	19	4	0	6	8	2	1	5	9	7	3
	19	20	0	7	3	9	6	5	2	1	8	4
		39	3	4	2	7	5	9	1	8	0	6
	7	21	7	8	4	1	3	2	6	5	9	0
	37	7	8	9	0	5	4	6	3	2	1	7
	17	26	9	1	7	2	0	3	4	6	5	8
	20	18	1	5	8	6	7	4	0	3	2	9
	16	18	5	2	9	3	8	0	7	4	6	1
9	9	8	2	6	1	4	9	7	8	0	3	5

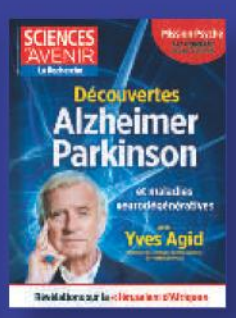
Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 915
Les solutions pour produire son énergie

N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

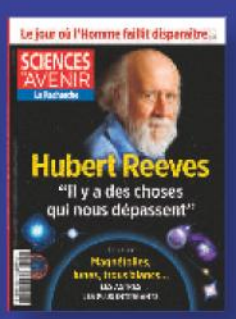
N° 917/918
Spécial
Eau



N° 919 Découvertes sur Alzheimer et Parkinson

N° 920
L'origine
du temps

N° 921
Aliments
et santé



N° 922
Hommage à
Hubert Reeves

N° 923
L'évangile oublié qui
bouleverse la Bible

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 915 ❑ N° 916 ❑ N° 917/918 ❑ N° 919
❑ N° 920 ❑ N° 921 ❑ N° 922 ❑ N° 923

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ÉGYPTOLOGIE

Qui a construit les pyramides ?

Barthelemy C.

« *Les Égyptiens nous ont laissé peu d'informations sur la façon dont les pyramides ont été construites* », explique Audran Labrousse, égyptologue. Mais l'image de milliers d'esclaves courbant l'échine sous les coups de fouet est fausse. « *L'esclavage n'existait pas en Égypte ancienne : la population était soumise à la corvée, qui imposait des journées de travail au bénéfice de l'État,* précise le spécialiste. *Les bâtisseurs étaient logés avec leur famille et nourris à proximité du chantier, dans un village construit pour eux.* » Le chantier de la pyramide de Kheops, érigée vers 2650 avant J.-C., comptait environ 20 000 ouvriers. ■ **Lise Loumé**

ZOOLOGIE

Pourquoi le zèbre a-t-il des rayures ?

David M. P.

La réponse n'est pas totalement connue. On sait que les rayures ne permettent pas au zèbre de se camoufler, car ses prédateurs ne le remarquent que de très près, quand ils peuvent sentir son odeur. Des biologistes britanniques avancent deux hypothèses : la première est que les rayures perturbent la vision des taons, vecteurs de maladies mortelles comme le rhume équin. À moins d'un mètre de l'équidé, ces insectes modifient soudainement leur trajectoire et s'écrasent sur lui. L'autre hypothèse est que les rayures aident le zèbre à réguler sa température : au soleil, de l'air chaud s'élève des rayures noires et de l'air plus frais des bandes blanches. Ce mouvement d'air sur le pelage facilite l'évaporation de la sueur. ■ **L. L.**

PLAINPICTURE

La position est calculée grâce aux signaux échangés entre le récepteur et au moins quatre satellites en orbite autour de la Terre.

GÉOLOCALISATION

Comment fonctionne le GPS ?

Stephan P.

Dans le langage courant, le GPS est devenu synonyme de positionnement par satellite. En réalité, le Global Positioning System est le système de navigation du gouvernement américain, opérationnel depuis 1995. Pour obtenir une position sur toute la planète avec une précision d'environ sept mètres 95 % du temps, il s'appuie sur une constellation de 31 satellites qui tournent autour de la Terre en envoyant en continu des signaux radio pour faire connaître leur position. Les signaux, dont la vitesse est connue, sont captés par un récepteur situé, par exemple, dans une voiture ou un smartphone.
Ces satellites contiennent des horloges atomiques afin qu'un récepteur puisse déterminer en continu l'heure à laquelle le signal est diffusé. « *Le récepteur utilise la différence de temps entre l'heure de réception du signal et l'heure de diffusion pour calculer la distance, ou la portée, entre le récepteur et le satellite* », explique l'Administration fédérale de l'aviation américaine (FAA). Un seul signal ne suffit pas pour que le récepteur affiche la localisation de son utilisateur. Il doit en recevoir de la part de quatre satellites GPS ou plus, afin d'affiner à chaque fois sa position tout en estompant les erreurs dues à l'imprécision des horloges contenues dans les voitures ou les smartphones. Autrement dit, « *le récepteur utilise quatre satellites pour calculer la latitude, la longitude, l'altitude et l'heure* », détaille la FAA.
D'autres systèmes de localisation par satellite existent aujourd'hui : le russe Glonass, le chinois Beidu et, depuis 2023, l'européen Galileo — le seul à être sous contrôle civil et non militaire. ■ **Anne-Sophie Tassart**

DOSSIER SPÉCIAL

Le nucléaire

La solution des petits réacteurs

92 Avant-propos
94 Le renouveau du nucléaire
98 Quel modèle économique ?
102 Le défi de l'acceptabilité
104 Des technologies à affiner
110 7 start-up françaises
116 Les ambitions américaines
120 La Chine sur tous les fronts

Projet de micro-centrale nucléaire destinée à produire de l'hydrogène en Corée du Sud.

USNC / RENÉ AIGNER

SCIENCES ET AVENIR La Recherche | Challenges

JOEL SAGET / AFP

AVANT PROPOS

Par Claude Perdriel
Directeur de la publication Sciences et Avenir-La Recherche

Le petit nucléaire met à portée de main la possibilité d'une énergie propre et bon marché

Le Giec a raison, au rythme actuel, le monde court vers une catastrophe climatique. Des centaines de millions d'êtres humains sont menacés. Avec aussi une crise économique qui toucherait et ruinerait des millions d'entreprises, des millions de salariés.
La solution de remplacer les énergies fossiles par des renouvelables est trop chère. Les pays du monde entier, trop endettés, ne pourront pas l'assumer. Ils seraient obligés d'en faire porter le poids à leurs peuples, qui ne l'accepteront pas et se révolteront. Faisant ainsi le lit des dictatures qui ont pour objectif de garder le pouvoir plutôt que de s'occuper du climat, au mépris de la morale et de l'humanité.
Rassurons-nous, ce scénario noir ne se produira pas, l'intelligence humaine, devant cet énorme défi, a déjà

C'est LA solution pour obtenir une énergie décarbonée qui donnera un avantage compétitif considérable aux industriels de notre pays

des solutions. Il suffit d'écouter les scientifiques – ce que les politiques qui nous gouvernent font rarement, plus intéressés par le pouvoir que par le progrès. Mais cette fois, l'urgence ne leur permet pas de repousser l'échéance.
En 1905, Einstein, armé seulement d'un cahier d'écolier et d'un stylo, eut l'intuition de la fameuse formule «$E=mc^2$» qui a bouleversé le monde.
Ce cahier d'écolier allait donner naissance à la fois à la bombe atomique et à l'énergie nucléaire.
Le Bon et le Mauvais. Pour la bombe, la communauté scientifique, qui a toujours été l'armée du progrès humain, a longtemps refusé d'y travailler, effrayée des conséquences. Il a fallu quarante ans pour que la lutte contre le mal – Hitler – la contraigne à tirer toutes les conséquences des équations contenues dans le cahier d'Einstein.
Après 1945, le secret de la fabrication de cette bombe fut jalousement gardé par l'Amérique. Il a fallu l'énergie et la volonté d'indépendance du général de Gaulle pour en doter la France également. Ceci grâce aux grandes écoles de mathématiques de notre pays, qui ont permis de former les milliers de chercheurs qui ont trouvé les solutions après plusieurs années de travail. Dans le même temps, ils mettaient au point les énormes réacteurs fournissant l'énergie nucléaire.
Leurs calculs indiquaient alors que plus leur puissance serait élevée, plus le prix de l'énergie générée baisserait. Mais ils n'avaient pas anticipé que les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima allaient créer de nouvelles contraintes de sûreté proportionnelles à la taille des centrales, avec un coût exponentiel. Chaque soudure, chaque vanne, chaque tuyau de ces immenses ensembles doit être protégé, la radioactivité maîtrisée et totalement confinée, c'est ruineux en investissement et en maintenance.
La solution, maintenant, ce sont au contraire des petits réacteurs de nouvelle génération, à neutrons rapides à sels fondus, faciles à protéger et qui peuvent être construits en série. Un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, Superphénix, a fonctionné en France pendant douze ans. La technique, connue, consiste à remplacer le sodium, explosif, par des sels fondus sans danger. Les

problèmes de sûreté et de maintenance sont simples et peu coûteux à résoudre : les enceintes de confinement sont réduites, les risques de corrosion maîtrisables. À condition de pouvoir produire industriellement ces réacteurs, le prix de revient d'un kilowattheure devient alors très faible, 6 centimes, alors que nous payons aujourd'hui 22 centimes. Cette énorme différence fait disparaître l'obstacle du financement politiquement inacceptable. Ce sera si rentable que déjà plus de 50 start-up se proposent d'avancer dans les mini-réacteurs et trouvent des investisseurs très intéressés. Il ne s'agit plus de financer mais au contraire d'encaisser. Énorme différence.
De plus, les réacteurs à neutrons rapides à sels fondus ont l'avantage de fonctionner avec les déchets radioactifs des grandes centrales. Que nous sommes aujourd'hui obligés de stocker et d'enfouir après un traitement coûteux. Ce sont ces déchets qui vont servir de combustible et dont on va pouvoir se débarrasser. Une économie sensible, un risque supprimé.
Cette solution technique, qui résout un problème auparavant insoluble, est maîtrisée par de nombreux chercheurs français. Espérons que, pour une fois, on va les écouter. C'est LA solution pour obtenir une énergie décarbonée, qui donnera de surcroît un avantage compétitif considérable aux industriels de notre pays, comme l'exploitation du gaz de schiste l'a donné aux Américains.
L'État, avec EDF, doit prendre en main ce chantier et assumer sa responsabilité, comme il l'a fait pour la cathédrale de Notre-Dame de Paris. C'est le moins qu'il puisse faire. Il sera possible, pour éviter un refus de la population face à de nouvelles installations nucléaires, de loger ces petits réacteurs en groupe dans les 18 centrales actuelles. Mais il faut aussi laisser le marché privé proposer des solutions viables de son côté, et éventuellement y participer.
Est-ce que les petits réacteurs représentent le stade ultime du progrès scientifique dans le domaine énergétique ? Certainement pas, il faut continuer à innover dans toutes les formes d'énergie décarbonée. Mais dans l'état actuel des connaissances, c'est la meilleure façon de lutter efficacement contre le dérèglement climatique. ■

PARTENARIAT

Célébrer l'innovation

tech&fest

Challenges et *Sciences et Avenir-La Recherche* donnent rendez-vous à tous les curieux des dernières tendances technologiques à tech&fest, l'événement qui célèbre le meilleur de l'innovation, les 1er et 2 février à Alpexpo, le parc événementiel de Grenoble. Pédagogique, sérieux mais aussi fun et festif, ce festival de la science réunira plus de 100 speakers dont le patron de Bpifrance, Nicolas Dufourcq, le président du CNRS, Antoine Petit, la directrice de France Digitale, Maya Noël, le P-DG d'Arianespace, Stéphane Israël, la capital-risqueuse Marie Ekeland, le cofondateur d'Alice & Bob Théau Peronnin, le physicien Étienne Klein, le youtubeur HugoDécrypte et bien d'autres. Grands groupes industriels et start-up de pointe, universités et labos, la crème de la science et de la tech tricolores sera là, au cœur de la « Silicon Valley » française, pour nous faire plonger dans les enjeux des nanotechs, des puces, du spatial, du quantique, de l'intelligence artificielle… et de la décarbonation, avec notamment une session sur les mini-réacteurs nucléaires. De quoi démontrer que la France reste une nation de têtes chercheuses et d'entrepreneurs de talent. Et donner aux jeunes le goût des sciences et l'envie de se projeter dans l'économie du futur.

La transition énergétique relance le nucléaire

Porté par l'urgence climatique, qui réclame une rapide conversion à une énergie décarbonée, et par la guerre en Ukraine, qui replace au premier plan l'indépendance énergétique, le nucléaire revient en faveur. Notamment avec les projets innovants de mini-réacteurs.

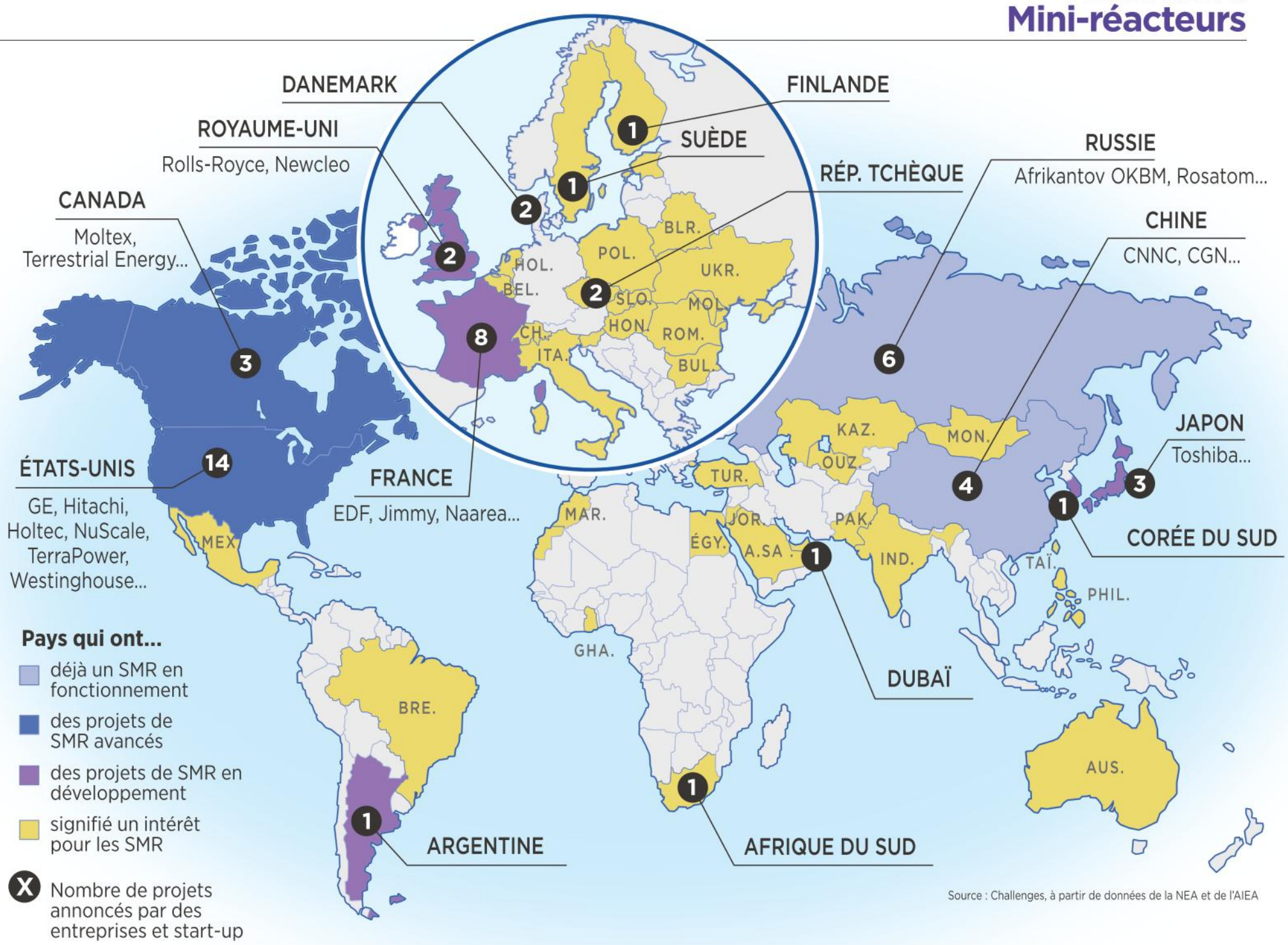
Plus de 20 pays ont signé, lors de la COP28 à Dubaï, une déclaration appelant à tripler la production nucléaire d'ici 2050.

LUDOVIC MARIN / AFP

Pour la première fois, dans son texte final publié le 13 décembre, la COP28 de Dubaï mentionne le nucléaire comme une des solutions face au réchauffement climatique. *« On ne peut pas atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 sans nucléaire »*, a affirmé l'émissaire américain pour le climat John Kerry lors d'une conférence où plus de 20 pays ont appelé à tripler la production nucléaire dans le monde dans ce délai. C'est le grand retour en grâce de l'atome, qui peut se prévaloir d'un excellent bilan carbone : selon l'Agence de la transition écologique (Ademe), en France, cette énergie rejette moins de 6 grammes de gaz à effet de serre par kilowattheure, énormément moins que le charbon (plus de 1 kg), le fioul (730 g), le gaz (420 g), et même moins que le solaire (30 g), l'éolien (15 g) et au niveau de l'hydraulique (6 g).

Le nucléaire revient de loin. La catastrophe de Fukushima en 2011 a mis un coup d'arrêt à de nombreux projets, poussant l'Allemagne à fermer ses centrales. Depuis, il était jugé trop risqué, avec notamment le problème non résolu des déchets. Trop cher et trop long à développer, avec les dérapages en termes de délais et de budget des nouveaux réacteurs. Avec moins de 10 % de l'électricité produite dans le monde, selon le World Nuclear Industry Status Report, contre 17,5 % en 1996, l'atome semblait sans avenir. Mais c'était avant que la guerre en Ukraine et l'explosion du prix du gaz due à la fermeture du robinet russe ne remettent au premier plan l'enjeu de la souveraineté énergétique. Un argument qui a redoré fortement l'image du nucléaire dans l'opinion publique. De plus, les experts prédisent une explosion de la demande mondiale d'électricité, qui pourrait tripler d'ici 2050. Car la transition hors du charbon, du pétrole et du gaz réclame une vaste *« électrification »* de l'économie. Et la sobriété réclamée par le Giec et Greenpeace ne semble pas à l'ordre du jour, les populations renâclant devant l'effort.

Les renouvelables n'y suffiraient donc pas, et c'est là que le nucléaire prend sa revanche. La Chine est à l'offensive *(lire p. 120)*. Aux États-Unis, les industriels sont encouragés par les milliards de subventions à la décarbonation *(lire p. 116)*. En Europe, Bruxelles a longtemps été sur la ligne hostile de Berlin, mais, lors du sommet sur le Green Deal en septembre, la présidente de la Commission Ursula von der Leyen a indiqué *« envisager d'autoriser des aides d'État »* au nucléaire. Et, en décembre, l'UE l'a inclus parmi les technologies permettant de verdir l'industrie. Le résultat



Source : Challenges, à partir de données de la NEA et de l'AIEA

BRUNO BOURGEOIS

de la pression de Paris, qui a rassemblé 15 pays européens dans l'Alliance du nucléaire afin d'imposer l'atome dans les lois du Green Deal, et avoir enfin accès aux financements verts.

C'est qu'il faudra de l'argent pour permettre la renaissance du nucléaire. Elle s'articule en trois étapes. D'abord, prolonger les réacteurs existants. En France, EDF s'y emploie depuis dix ans dans un programme de rénovation d'une cinquantaine de milliards d'euros. Prévues pour durer quarante ans, les centrales devront fonctionner dix ou vingt ans de plus. Aux États-Unis, six unités pourront aller jusqu'à 80 ans. Ensuite, il s'agit de lancer une nouvelle gamme de réacteurs respectant des normes de sécurité post-Fukushima. En 2022, Emmanuel Macron a annoncé la construction de six EPR d'ici 2050, puis potentiellement huit autres. Un vrai défi quand on sait que le premier, celui de Flamanville, n'est toujours pas opérationnel, alors qu'il était prévu pour 2012 et que sa facture a quintuplé, atteignant 19 milliards d'euros. Outre-Atlantique, un premier AP1000 de Westinghouse vient d'être branché avec sept ans de retard et un budget doublé, à 15 milliards de dollars.

Enfin, la filière mise sur un nouveau filon : des réacteurs dix à cent fois moins puissants, dits SMR *(small modular reactors* en anglais*)*, fabriqués en série. Ces unités, dont certaines explorent des technologies innovantes *(lire p. 104)*, font le buzz. Électricité, chauffage, vapeur, dessalement de l'eau de mer, les SMR ciblent une multitude d'applications, avec l'ambition de jouer un rôle central dans la transition énergétique. Plus de 80 projets sont en cours dans 18 pays, indique l'Agence internationale de l'énergie atomique, notamment en France *(lire p. 110)*. Les premiers modèles pourraient sortir à l'horizon 2030. Mais il y aura des obstacles à franchir – technologiques, réglementaires et d'acceptabilité sociale *(lire p. 102)*. Il faudra surtout trouver le modèle économique adéquat *(lire p. 98)*.

En novembre, l'entreprise américaine NuScale annonçait l'abandon de sa première petite centrale pilote, confrontée à une flambée des coûts qui a doublé le budget, à 9,3 milliards de dollars. Le chemin des pionniers du petit nucléaire est encore long. ■ **Nicolas Stiel**

Production d'électricité mondiale en 2022

30,2 % Renouvelables (hydraulique, éolien, solaire...)

60,6 % Énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole)

Source : Energy Institute

PÂRIS MOURATOGLOU
Président du groupe Eren

« Sans nucléaire, il n'y a pas de solution à la crise climatique »

Pionnier des énergies renouvelables, Pâris Mouratoglou, 83 ans, a développé des projets hydrauliques, éoliens et solaires partout dans le monde. Et fait fortune deux fois, revendant sa première société à EDF en 2011 et sa seconde à TotalEnergies en juillet dernier. A la tête d'Eren, dotée de 2 milliards d'euros, l'entrepreneur investit désormais dans d'autres énergies bas carbone – la géothermie, la biomasse, le biogaz, l'hydrogène… et les petits réacteurs nucléaires (SMR en anglais).

Pourquoi avez-vous choisi d'investir dans les SMR ?
Face à l'urgence climatique, le temps nous est compté. Les catastrophes naturelles se multiplient, nous sommes en train de rendre la planète inhabitable pour beaucoup d'humains. Et les promesses d'arriver à la neutralité carbone en 2050 sont irréalistes. En 2023, les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont continué d'augmenter ! Impossible d'espérer contenir la hausse des températures à 1,5 °C, il est déjà trop tard. Pour limiter les dégâts, la priorité absolue doit être de sortir au plus vite du charbon, du pétrole et du gaz. Et pour ce faire, je ne crois pas trop à la sobriété : les gens se disent préoccupés du réchauffement climatique mais ils ne veulent pas changer vraiment leurs habitudes, restreindre leur mode de vie. Du coup, si la consommation d'énergie ne baisse pas, il faut au moins qu'elle

BRUNO LEVY / CHALLENGES

soit décarbonée. Et là, sans nucléaire, pas de solution. Il est indispensable d'accélérer dans les énergies renouvelables mais ça ne suffira pas : on manque de place, de soleil, de vent, il y a des problèmes de stockage, de transport, d'intermittence. Il faut donc aussi construire de nouvelles grandes centrales nucléaires et, en complément, miser sur de petits réacteurs qui ont d'autres usages, par exemple pour générer de la chaleur industrielle, ou qui peuvent être installés dans des pays émergents.

Vous avez mis de l'argent dans les start-up Naarea et Jimmy, deux projets très différents…
L'avantage de Jimmy, c'est la maturité de leur projet : il s'appuie sur des technologies existantes et un design simplifié. Et leur plan de fournir de la chaleur est intelligent parce que bien des industries en ont besoin et n'ont pas d'alternative compétitive au gaz ni au charbon. Naarea, c'est un pari sur une innovation de rupture : leur projet de réacteur à neutrons rapides et à sels fondus est inédit et a priori idéal car il permet de brûler les combustibles usés existants des grandes centrales, avec, de plus, une sûreté complète. Mais il y a encore des obstacles technologiques importants, et il est probable que le premier réacteur ne sera pas opérationnel avant 2030.

Ne craignez-vous pas un problème d'acceptabilité sociale pour implanter des mini-réacteurs ?
C'est vrai que le nucléaire charrie dans l'imaginaire des gens une peur au-delà du rationnel. Mais les SMR en développement ont tous des systèmes de sécurité passive qui rendent le risque d'accident faible. Et surtout, quand ils sortiront de terre, les effets du réchauffement seront plus manifestes, la question du prix et de l'abondance de l'énergie plus préoccupante, ce qui devrait faire évoluer l'opinion publique.

Le nucléaire a la réputation de ne pas être à la hauteur de ses promesses, en quoi serait-ce différent pour les SMR ?
C'est faux. Dans les années 1970 et 1980, nombre de centrales ont été construites en France dans les délais et le budget impartis et fournissent encore aujourd'hui une énergie fiable à bon prix. Ce sont les gouvernements successifs qui, ensuite, ont bloqué cette industrie, laissant se perdre le savoir-faire. Pour les SMR, il y a nombre de start-up, de multiples modèles et technologies, et tout n'aboutira pas. Ces investissements sont très risqués, c'est aussi pourquoi Eren participe, car cela rassure les autres investisseurs. Pour que ça fonctionne, il faut, outre la R&D et les financements, un cadre réglementaire non étouffant et une taxe carbone plus forte, pour détourner des énergies polluantes. ■ **Propos recueillis par Gaëlle Macke et Nicolas Stiel**

assystem

ENVIE DE SWITCHER ?

ASSYSTEM RECRUTE 2 500 NOUVEAUX COLLABORATEURS EN 2024 EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL, DONT PLUS DE 1 500 DANS LE SECTEUR NUCLÉAIRE

Postulez ici :

Rejoignez la communauté des Switchers et contribuez à accélérer la transition énergétique !

Le futur de l'industrie nucléaire commence avec vous !

D'ici à 2030, la filière nucléaire française devrait recruter plus de 100 000 personnes, notamment pour répondre aux enjeux liés à la construction des futurs EPR2, un programme essentiel pour lutter contre le dérèglement climatique. En effet, la production d'une électricité bas-carbone, pilotable et abordable issue de l'énergie nucléaire est clé pour accélérer la transition énergétique.

Chez Assystem, 3ème ingénierie nucléaire dans le monde, nous recrutons chaque année 1 500 talents pour accompagner nos activités nucléaires ainsi que 300 stagiaires et alternants. Saisissez l'opportunité de contribuer à la transition énergétique en rejoignant notre entreprise qui vous offrira de nombreuses opportunités professionnelles !

Nous vous donnerons les moyens de monter en compétence et en responsabilité : nos salariés bénéficient de 100 000 h de formation par an et 70% de nos managers sont issus de la promotion interne. Vous n'avez pas d'expérience dans le nucléaire et vous êtes demandeur d'emploi ? Nous vous accompagnons ! En collaboration avec France Travail (ex Pôle emploi), nous proposons un programme de formation permettant de développer les compétences nécessaires afin d'évoluer au sein de la filière.

Construisez votre carrière dans le nucléaire chez Assystem !

Les SMR pourraient fournir en électricité bas carbone les usines de dessalement d'eau de mer.

FAYEZ NURELDINE / AFP

Des modèles économiques prometteurs à concrétiser

Les mini-réacteurs ciblent une multitude d'applications : production d'électricité et de chaleur, vapeur, propulsion, dessalement d'eau… Et leur rentabilité viendrait d'un design simplifié et d'une fabrication en série avec des coûts de maintenance réduits.

C'est l'emballement autour des mini-réacteurs nucléaires (SMR en anglais). Encore largement à l'état de concepts qui ne se concrétiseront pas avant une dizaine d'années, ils électrisent les industriels du secteur, attirent les start-up, séduisent les investisseurs. C'est que leur marché potentiel est énorme : pour limiter le réchauffement climatique, il s'agit de sortir au plus vite du charbon, du pétrole et du gaz, qui représentent aujourd'hui plus de 80 % de l'énergie utilisée dans le monde. Certes, les énergies renouvelables sont devenues une alternative décarbonée efficace : en France, en dix ans, les prix du solaire ont été divisés par quatre et ceux de l'éolien quasiment par deux, offrant un tarif comparable, voire inférieur au nucléaire « historique », à 60 euros le mégawattheure (MWh). Et sur le long terme, ils vont continuer de baisser, contrairement à ceux du nucléaire car *« les tarifs s'appuient aujourd'hui sur des centrales amorties qui fermeront d'ici vingt ans, mais ils vont s'envoler pour les nouvelles centrales aux normes de sécurité renforcées post-Fukushima »*, souligne Yves Marignac, de l'association antinucléaire négaWatt.

Sauf que les SMR introduisent un changement de paradigme. *« Leur large gamme de puissance, leur petit encombrement qui permet de les installer partout, leur sûreté intrinsèque et leur éventail de technologies élar-*

JOHAN BEN AZZOUZ/POOL-REA

Une tonne de verre émet 510 kg de CO_2 car les fours fonctionnent au gaz ou au fioul. La chaleur produite par les SMR pourrait remplacer ces énergies fossiles.

gissent leur marché potentiel, ouvrant des opportunités inaccessibles au "gros nucléaire" comme aux énergies renouvelables », explique Michel Berthélemy, de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE. Par exemple, le marché de la chaleur industrielle. Pour la papeterie, la verrerie, la métallurgie, la chimie, la cimenterie ou l'agroalimentaire, *« la chaleur représente près de 75 % de leur consommation énergétique, obtenue en brûlant du charbon ou du gaz, et ces industries sont coincées pour décarboner, faute d'alternative à un prix raisonnable,* expose Antoine Guyot, patron de la start-up Jimmy, qui développe un réacteur à haute température *(lire p. 110). L'électricité n'est pas une solution très efficace, le biogaz et l'hydrogène sont encore peu disponibles. »*

Or justement, la fission nucléaire produit originellement de la chaleur : en supprimant sa conversion en électricité, on élimine les équipements afférents et on améliore le rendement, ce qui permet de tirer les prix vers le bas, jusqu'à 40 euros le MWh « thermique ». Et il existe dans le monde plus de 10 000 sites industriels très consommateurs de chaleur et donc très polluants. Au Texas, Dow Chemical a déjà signé un accord avec une start-up, X-energy, pour implanter un SMR sur son site. D'autres visent le marché, également prometteur, du chauffage urbain pour le compte des collectivités locales, avec de petites chaudières nucléaires en périphérie des villes.

Autre débouché intéressant, réservé aux réacteurs taille XS : la propulsion nucléaire pour les 5 000 gros cargos porte-conteneurs qui aujourd'hui naviguent au fioul lourd. Les SMR, transportables, nécessitent un rechargement en combustible tous les dix ans seulement. Ils pourraient donc alimenter des zones isolées (la Russie opère déjà une mini-centrale flottante en Sibérie, *lire p. 122*), voire des régions des pays en développement qui n'ont pas de grand réseau de transport électrique et recourent aujourd'hui à des groupes électrogènes à essence. Plusieurs pays asiatiques et africains ont manifesté leur intérêt, notamment pour alimenter des mines ou une usine de dessalement de l'eau de mer.

Nucléaire et gigantisme ne font plus bon ménage

Les plus gros SMR peuvent également remplacer les centrales à charbon (on en compte 2 400 dans le monde) ou à gaz, avec, si on les compare aux fermes solaires ou éoliennes ou aux gros réacteurs, l'avantage de prendre le relais place pour place. Enfin, les SMR peuvent, comme les autres sources d'électricité bas carbone, être utilisés pour produire des carburants verts, de l'hydrogène, de l'ammoniac, ou du fuel de synthèse.

ANTON DENISOV/SPUTNIK/ABACA

Comparé à l'éolien ou au solaire, le mini-réacteur a l'avantage de pouvoir se substituer place pour place à une centrale thermique fonctionnant au charbon, au gaz ou au fioul.

OLIVER TJADEN/LAIF/RÉA

Certains navires de fret pourraient à terme être propulsés par une « batterie » nucléaire, qui demanderait un ravitaillement peu fréquent et une maintenance limitée.

Encore faut-il que leur prix soit compétitif. Jusqu'ici, l'industrie nucléaire a vu toujours plus grand pour faire des économies d'échelle – plus la taille du réacteur augmente, plus le coût de production du MWh baisse. Mais les dérives budgétaires dans les chantiers des nouveaux réacteurs – les EPR de Flamanville en Normandie, Hinkley Point en Angleterre et l'AP1000 de Westinghouse aux États-Unis – ont fait grimper le prix du MWh autour de 110 euros, et donc fait réfléchir.

Des réacteurs qui s'assemblent comme des Lego

Les SMR suivent un autre modèle, misant sur les économies de la fabrication en série. Leur rentabilité passe par un design simplifié – leur faible puissance et leur technologie permettent de garantir une sûreté « par nature », sans les systèmes complexes et coûteux de sécurité des EPR – et surtout par la standardisation, avec des composants fabriqués en série en usine et assemblés sur place. Les coûts de maintenance seraient également réduits. Ainsi, tous les projets prévoient des prix compétitifs, autour de 60 euros le MWh électrique.

Cependant, le revers de la start-up américaine NuScale a de quoi effrayer : ses clients l'ont lâchée face à l'explosion des coûts. En cause, notamment, les frais de dossier pour obtenir la certification de l'autorité de sûreté américaine *(lire p. 118)*. *« Les concepts des SMR sont enchanteurs sur PowerPoint mais, avec l'atome, le passage à la réalité est généralement ruineux »*, tacle Yves Marignac. *« Les coûts d'un démonstrateur pionnier sont toujours assez incontrôlables et peu prédictifs du coût commercial. Ça ne remet pas en cause l'intérêt du projet »*, relativise l'investisseur Pâris Mouratoglou *(lire p. 96)*. Les start-up françaises anticipent un investissement total entre 300 millions et 3 milliards d'euros pour monter leur filière sur dix ans. Il leur faut donc des investisseurs et des clients solides et prêts à prendre des risques.

La certification est un premier « crash test » majeur, sachant que certains concepteurs de SMR développent des technologies prometteuses (sels fondus, neutrons rapides) – mais bien moins éprouvées que celles de NuScale – et ont donc plus de travail à fournir pour démontrer leur sûreté aux régulateurs nationaux. Qui doivent de leur côté réviser leurs méthodes pour ne pas étouffer l'innovation, et harmoniser leurs règles pour permettre les ventes à l'international. Les start-up développant des options techniques nouvelles font aussi face au défi de l'approvisionnement en uranium, qui n'est pas de la même qualité que celui des centrales classiques. Ainsi, Newcleo et Naarea viennent d'annoncer une alliance à la fois pour partager certains coûts de R&D, pour formaliser leur dossier à présenter à l'Autorité de sûreté nucléaire et pour monter une même filière de retraitement de leur combustible. Jimmy prévoit aussi, de son côté, de construire sa propre usine de combustible.

Enfin, nul ne sait combien de mini-réacteurs il faut fabriquer et exploiter pour profiter de l'effet de série nécessaire à la rentabilité. *« On peut imaginer qu'il y aura, au final, une petite dizaine des marchés adressables et deux ou trois leaders sur chacun »*, estime Michel Berthélemy. Il n'y aura donc pas de place pour tout le monde dans ce rêve d'une énergie du futur abondante, propre et bon marché. ■

Gaëlle Macke

MAKSIM SAFANIUK / ALAMY STOCK PHOTO

Plusieurs pays d'Asie et d'Afrique ont manifesté leur intérêt pour les SMR, qui permettraient d'alimenter en énergie des sites isolés, telles les mines.

PUBLI
RÉDACTIONNEL

La Meuse : terre d'expérimentations industrielles

Jérôme Dumont, président du Département de la Meuse, nous a parlé du Groupement d'Intérêt Public (GIP) « Objectif Meuse » qu'il préside et qui est devenu un véritable levier de développement économique et d'innovation de son territoire.

Jérôme Dumont, président du Département de la Meuse

Quelle sorte de président êtes-vous ?

Je suis un entrepreneur qui défend l'intérêt général ! Je me bats tous les jours pour développer la Meuse, attirer des investisseurs ainsi que de nouveaux talents, favoriser des expérimentations et porter une vision de développement à long terme. J'ai souhaité faire de la Meuse le 1er département rural innovant de France. Mon ambition est de structurer le territoire vers des filières d'excellence en lien avec les politiques publiques stratégiques : la transition énergétique, la décarbonation et le déploiement de grands projets technologiques ou industriels en milieu rural.

Quel est le rôle du GIP Meuse en matière économique ?

C'est un accélérateur de projets privés et publics en Meuse.
Nous finançons des start-ups, des PMEs, mais aussi des groupes qui investissent dans le Département. La force de frappe du GIP est de permettre la rencontre entre des ambitions locales et des stratégies industrielles nationales.
Je souhaite également accompagner les acteurs de la formation pour leur permettre de répondre aux besoins du monde industriel et des métiers en tension. Un enjeu essentiel.

Nous nous mobilisons sur tous les thèmes en lien avec l'innovation puis les expérimentations, processus clé pour le développement des PME. Le GIP peut financer leurs programmes de recherche industrielle sur plusieurs années.
L'innovation passe également par de nouvelles formes de coopération. Nous sommes à l'origine d'un Pôle de Compétences en Environnement Souterrain. Il propose des formations continues pour tous les métiers liés aux travaux souterrains et des échanges entre les acteurs de ces métiers. Le PoCES repose sur un partenariat inédit et innovant entre : l'Andra, l'Ecole des Mines de Nancy, le GIP Meuse et une collectivité territoriale (Portes de Meuse).

Quelques autres exemples d'innovations ?

Le GIP accompagne par exemple depuis quinze ans un centre de recherche industrielle et de transfert de technologies : le CRITT TJFU. Il est spécialisé sur les sujets de recherches liés au rôle des jets fluides sur le traitement et la fonctionnalisation des matériaux.

Nous avons permis au CRITT de créer une plateforme pour proposer aux PME des solutions technologiques.
Nous avons récemment inauguré la plus grande centrale solaire thermique de France qui alimente en chaleur le site de Lactalis de Verdun pour les 25 prochaines années. Cette réalisation, portée par la société Newheat – Lactosol, cofinancée par le GIP Objectif Meuse, est au cœur des enjeux énergétiques et climatiques.

LE GIP OBJECTIF MEUSE, C'EST :

- Un accélérateur de projet,
- Un partenaire aux côtés des investisseurs publics et privés,
- Un acteur qui les accompagne dans la durée.

Il accompagne :
- Le développement du tissu industriel et économique,
- Les actions de formation,
- Les projets en lien avec la transition énergétique et les nouvelles technologies de l'énergie,
- L'aménagement du territoire, plus spécifiquement, les actions utiles à l'insertion territoriale du projet Cigéo porté par l'Andra en Meuse.

QUELQUES CHIFFRES :

- Un budget annuel de 28 M€,
- 4500 projets aidés depuis 2008,

Ces 2 dernières années :
- 51 M€ d'aides sur le territoire meusien ;
- Près de 17 M€ engagés pour soutenir les investissements des entreprises en Meuse ;
- Plus d'une quarantaine de projets financés portant sur des investissements liés à la maitrise de l'énergie et la transition énergétique.

Le défi de l'acceptabilité sociale

Comment les Français pourraient réagir à l'implantation d'un petit réacteur nucléaire dans leur proche environnement ? Un gros effort de pédagogie sera nécessaire.

C'est la grande peur, un peu taboue, des constructeurs de petits réacteurs (SMR) : la population sera-t-elle prête à accepter de voir s'implanter sur le territoire national des dizaines, voire des centaines de mini-centrales atomiques ? Le nucléaire, qui s'est fait connaître par les deux bombes lancées contre le Japon pendant la Seconde Guerre mondiale, et qui reste l'arme de dissuasion militaire ultime, est un sujet sensible. Et les catastrophes des centrales de Tchernobyl et Fukushima ont effrayé durablement *(lire ci-contre)*, même si elles ont causé peu de victimes en comparaison de la pollution de l'air liée à l'utilisation du charbon, du pétrole et du gaz, qui tue 5 millions de personnes par an dans le monde. *« Dans un calcul entre le bénéfice et le risque, le nucléaire est de loin l'énergie la plus sûre »*, martèle l'influent Jean-Marc Jancovici, fervent partisan de l'atome au nom de l'environnement. Mais *« ce n'est pas l'approche du grand public, qui voit surtout le danger en cas d'accident. Cela s'inscrit dans l'espace, avec des zones évacuées, et dans le temps, avec des effets sanitaires potentiels des irradiations sur des dizaines d'années,* analyse Maël Goumri, sociologue à l'université Paris Dauphine. *Il y a aussi un facteur d'incertitude et d'opacité quant à la gestion des déchets qui inquiète* ».

AUDE PAGET / INA / AFP

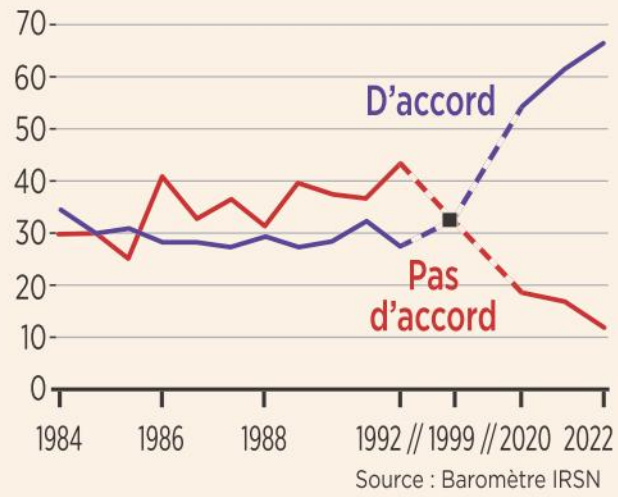
« Le gouvernement devra prendre le temps de la concertation, contrairement à ce qui a été fait pour le nouvel EPR à Penly, où le débat public a été bâclé »

Sezin Topçu, sociologue au CNRS.

L'image du nucléaire s'est cependant spectaculairement améliorée : selon le sondage annuel de l'Autorité de sûreté nucléaire, en 2022, 46 % des Français s'y sont déclarés favorables, soit le score le plus haut depuis la première édition de 2005, contre 23 % au niveau le plus bas, en 2018. Et seuls 12 % se disent opposés, contre 29 % en 2018. Par ailleurs, selon un sondage de l'Agence de la transition écologique (Ademe) comparant les sources d'énergie, l'atome est plébiscité comme la plus performante et la plus apte à assurer une indépendance

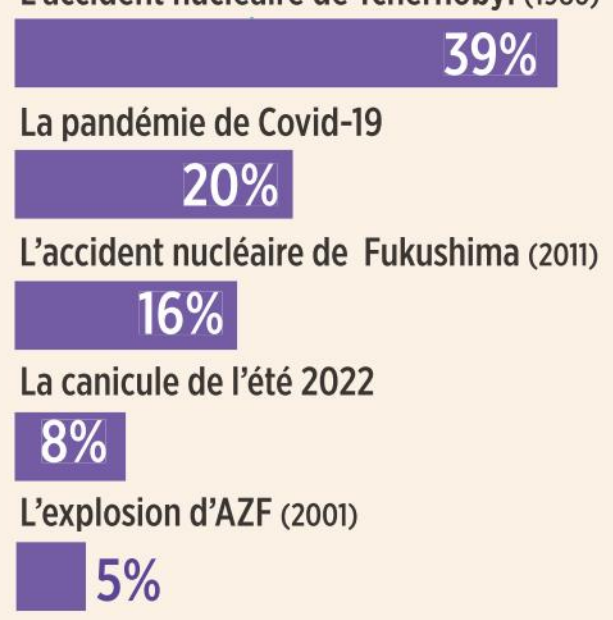
BRUNO BOURGEOIS

Construire des centrales nucléaires a été une bonne chose (en %)



Source : Baromètre IRSN

Parmi ces événements catastrophiques, lequel vous semble le plus effrayant ?



Sondage réalisé par Harris Interactive pour l'IRSN auprès d'un échantillon de 2 014 personnes représentatif de la population française, du 23 au 30 novembre 2022.

Êtes-vous favorable au développement de réacteurs nucléaires SMR ?

Seriez-vous favorable à un chauffage urbain alimenté par un SMR dans votre commune ?

Sondage réalisé par Cluster17 pour Calogena auprès d'un échantillon de 1 499 personnes représentatif de la population française, du 14 au 15 novembre 2023.

énergétique. Or, *« depuis le blocus du gaz russe, la souveraineté est revenue au premier plan »*, expose Valérie Faudon, déléguée générale de la Sfen, une association de scientifiques et professionnels du secteur. L'argument climatique porte moins : *« Plus de la moitié des gens n'ont aucune idée que c'est une énergie bas carbone »*, regrette-t-elle.

Les SMR sont par nature des installations de proximité

Quant aux petits réacteurs, très peu de Français en ont entendu parler. Et même si leurs concepteurs certifient que leur sûreté est très élevée du fait de leur petite taille et de leur technologie innovante, gageons que cette « prolifération nucléaire » ne se fera pas sans résistances. Ainsi, seuls 51 % des Français seraient prêts à accepter qu'une *« toute petite chaudière nucléaire »* soit installée dans leur commune *(lire ci-contre)*. Certes, on peut héberger des SMR sur les sites déjà nucléarisés mais ils doivent se trouver de préférence au plus près des besoins, notamment lorsqu'ils génèrent de la chaleur, qui se transporte peu. *« En 2030, quand il faudra choisir entre le nucléaire et la sobriété forcée ou des coupures intermittentes de courant, l'opinion se ralliera »*, glisse le dirigeant d'une start-up du secteur.

Cependant, plus encore que pour les méthaniseurs ou les éoliennes, *« on peut s'attendre à des contestations de riverains, des actions militantes,* prédit Sezin Topçu, sociologue au CNRS. *Et le gouvernement devra prendre le temps de la concertation, contrairement à ce qui a été fait pour la construction d'un nouvel EPR à Penly, en Normandie, où le débat public a été bâclé »*. Valérie Faudon renchérit : *« Un gros effort pédagogique sera nécessaire localement pour montrer les avantages de l'implantation d'un mini-réacteur au bénéfice des entreprises, mais aussi des habitants en matière de chauffage ou d'électricité à bon prix »*. Il faudra aussi rassurer face à une demande forte de contrôles de sûreté par l'État. Vaste programme. ■ **Gaëlle Macke**

Joël Barre, DINN

Après un peu plus d'un an d'existence, pouvez-vous revenir sur les missions et les travaux conduits par la Délégation interministérielle au nouveau nucléaire ?

La Délégation interministérielle au nouveau nucléaire (DINN) que j'ai l'honneur de diriger depuis la fin d'année 2022 est actuellement constituée de 8 collaborateurs, dont mon adjoint Vincent Le Biez, et a vocation à atteindre une quinzaine de personnes dans les prochains mois. Nous avons pour mission de superviser la réalisation des projets industriels de « nouveau nucléaire » en France, l'objectif étant de renouer avec le succès industriel du grand programme des décennies 1970 à 1990 dont la cinquantaine de réacteurs construits forment ce qu'on appelle aujourd'hui le « nucléaire existant ».

À ce jour, notre périmètre couvre principalement le programme Nouveau Nucléaire France (NNF) de construction de 6 nouveaux réacteurs de type EPR2, avec l'étude d'une extension pour 8 autres. S'y ajoute le projet Nuward de petit réacteur modulaire développé par EDF ainsi que le réacteur de recherche Jules Horowitz qui est en cours de construction. En pratique, la DINN assure trois types de mission : la supervision de la maîtrise d'ouvrage de ces projets, la coordination des pouvoirs publics concernés et, enfin, la contribution à l'information du public et à la mobilisation des forces vives du pays autour de ce programme.

Le principal travail réalisé durant l'année 2023 a été la conduite d'une revue de programme, conduite par la maîtrise d'ouvrage d'EDF, visant à offrir une vue panoramique sur la situation du programme NNF à date. Elle s'est accompagnée de la réalisation d'une étude portant sur l'état de préparation de la filière nucléaire ainsi que d'un audit de révision du chiffrage du programme. Cette revue a permis de formuler des recommandations à la fin de l'année dernière et doit à nouveau se réunir mi 2024 pour faire le point sur les actions d'optimisation menées par EDF. En parallèle, nous contribuons aux travaux de définition d'un schéma de financement et de régulation adapté, au suivi des procédures d'autorisation et de concertation, ainsi qu'aux actions de valorisation et d'attractivité de la filière.

Quels sont les enjeux prioritaires du programme « Nouveau Nucléaire France » pour les prochains mois ?

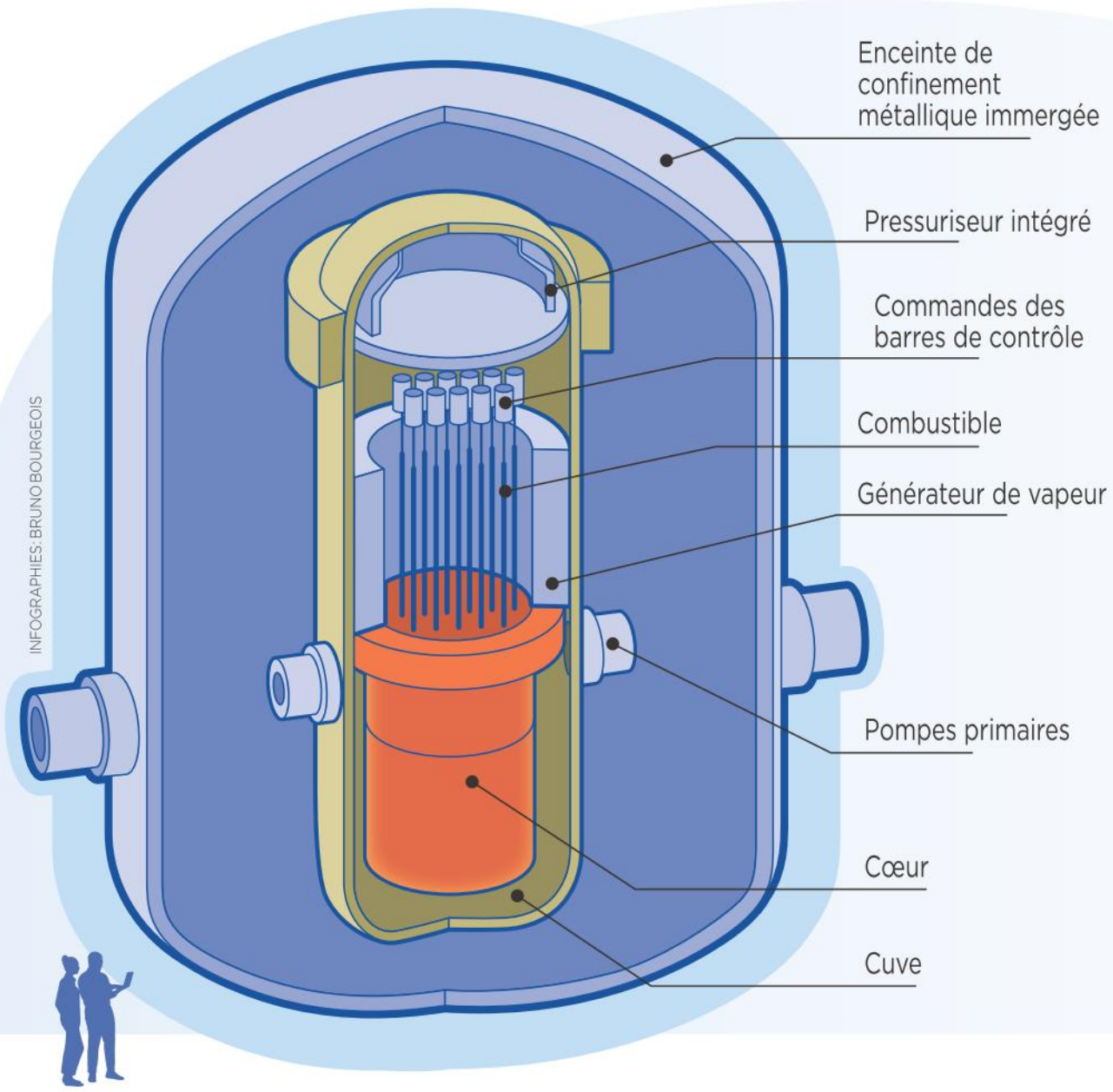
Le premier enjeu est celui de l'optimisation du programme sur le plan de la performance industrielle, avec des actions de compétitivité menées par EDF en lien avec sa chaîne d'approvisionnement. Il s'agit de tout mettre en œuvre pour bénéficier de l'effet de dégressivité permise par l'approche programmatique. Un deuxième enjeu de taille est celui de l'attractivité du nucléaire pour réussir la montée en charge qui nous attend (100 000 recrutements dans les 10 prochaines années) : il faut en particulier réussir à donner aux jeunes l'envie et les moyens de rejoindre cette filière dont la contribution à la réindustrialisation et à la transition énergétique est primordiale. A ce titre, le renforcement de l'implication de l'Etat aux côtés d'EDF et de la filière pour définir un cap et s'y tenir me semble bienvenu.

Des technologies plus ou moins abouties

Nombre de concepteurs de petits réacteurs ont choisi de miniaturiser la technologie équipant les grandes centrales nucléaires en fonctionnement. D'autres parient sur des innovations prometteuses comme les neutrons rapides ou les sels fondus.

SMR. Trois lettres pour décrire le nouveau champ d'innovations de l'industrie nucléaire, décliné en quelque 80 concepts en développement, de la Chine aux États-Unis, de la Russie au Royaume-Uni en passant par la France. Que cache ce sigle ? Le R, pour *reactor*, désigne un réacteur : comme les centrales classiques, les SMR ont pour objet de produire de l'énergie à partir de la fission nucléaire. Le principe : bombarder des neutrons sur des noyaux lourds d'uranium – le combustible – pour qu'ils se scindent en noyaux plus légers. Cette opération libère de la chaleur mais aussi d'autres neutrons qui provoqueront à leur tour des fissions, entraînant une réaction en chaîne. Cette chaleur peut être convertie en électricité.

Mais derrière ce point commun, ce sont plutôt le S, pour *small,* et le M, pour *modular,* qui font l'originalité des SMR. Ces réacteurs sont petits, de 10 à 300 mégawatts (MW), contre 1 600 MW pour l'EPR (réacteur pressurisé européen), le réacteur XXL d'EDF. Avantage de cette taille réduite : les unités prennent peu de place, et peuvent s'installer au plus près des clients, permettant une grande variété d'usages *(lire p. 98)*. Cela convient à la production de chaleur,



INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

Réacteur à eau pressurisée

Modèle réduit de la filière majoritaire des réacteurs en service à travers le monde, ce type de réacteur utilise comme combustible des assemblages de pastilles d'uranium qui chauffent de l'eau sous pression. La chaleur est convertie en électricité dans des générateurs.

Le plus : une technologie fiable, maîtrisée à l'échelle industrielle, également pour l'approvisionnement en combustible.

Le moins : la génération de déchets radioactifs sur des siècles ; le besoin d'une source froide (fleuve ou mer).

L'écueil : la complexité de construction selon les normes de sécurité modernes.

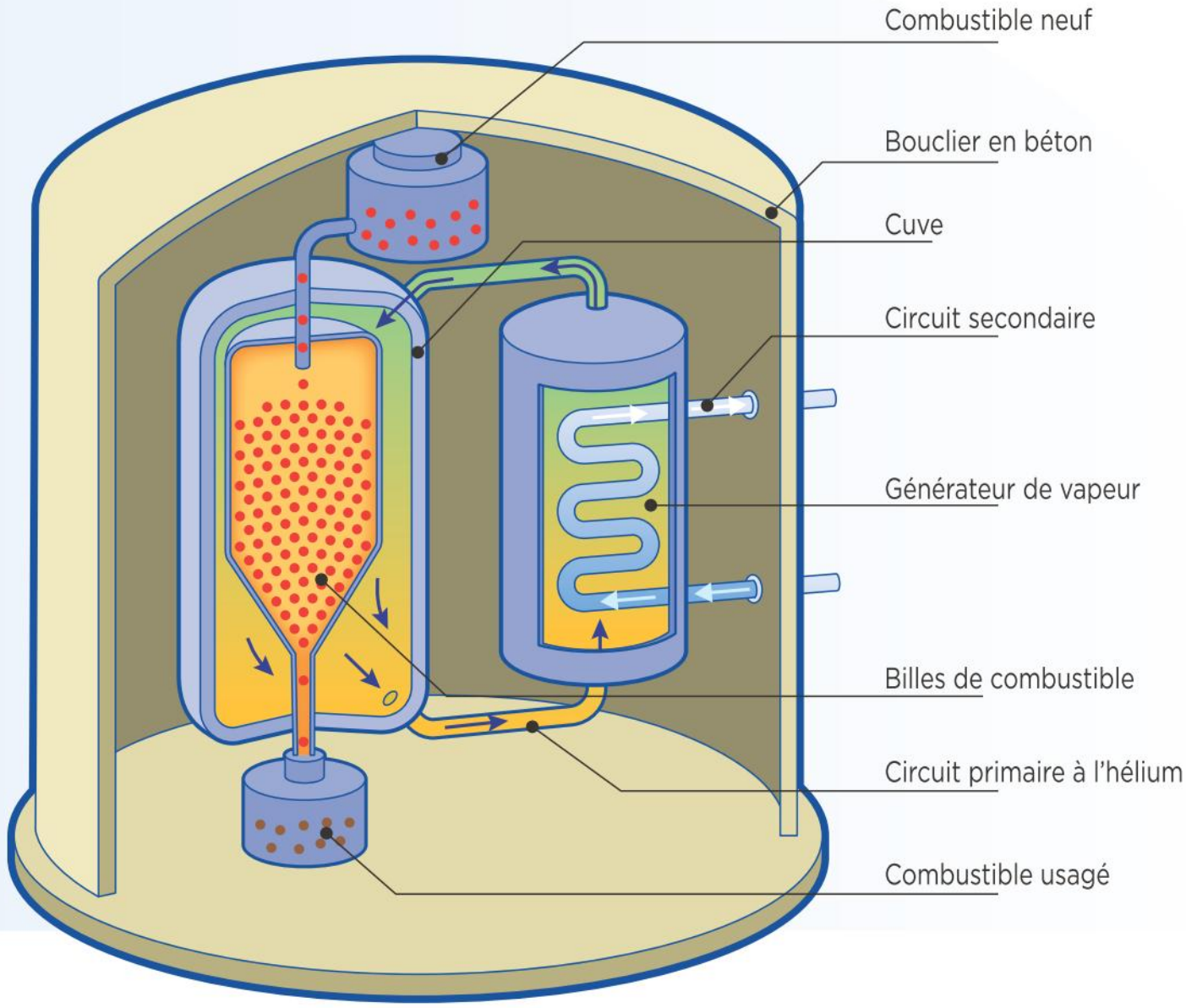
Réacteur à haute température

Le combustible est constitué de billes – le Triso –, où l'uranium est enfermé dans des couches protectrices qui retiennent les produits de fission. Le refroidissement est fait à l'aide d'un gaz, ici l'hélium, qui transporte aussi la chaleur.

Le plus : une sûreté accrue grâce à la structure du combustible et une meilleure résistance à la chaleur permettant d'atteindre des hautes températures.

Le moins : la génération de déchets radioactifs à vie longue.

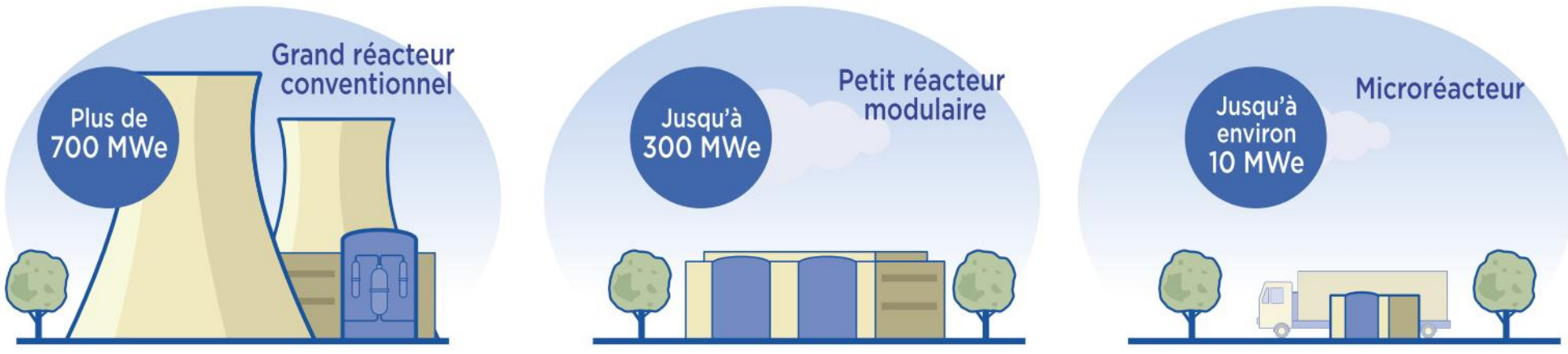
L'écueil : L'approvisionnement en combustible, pour l'instant uniquement fabriqué par quelques pays, mais pas en France.

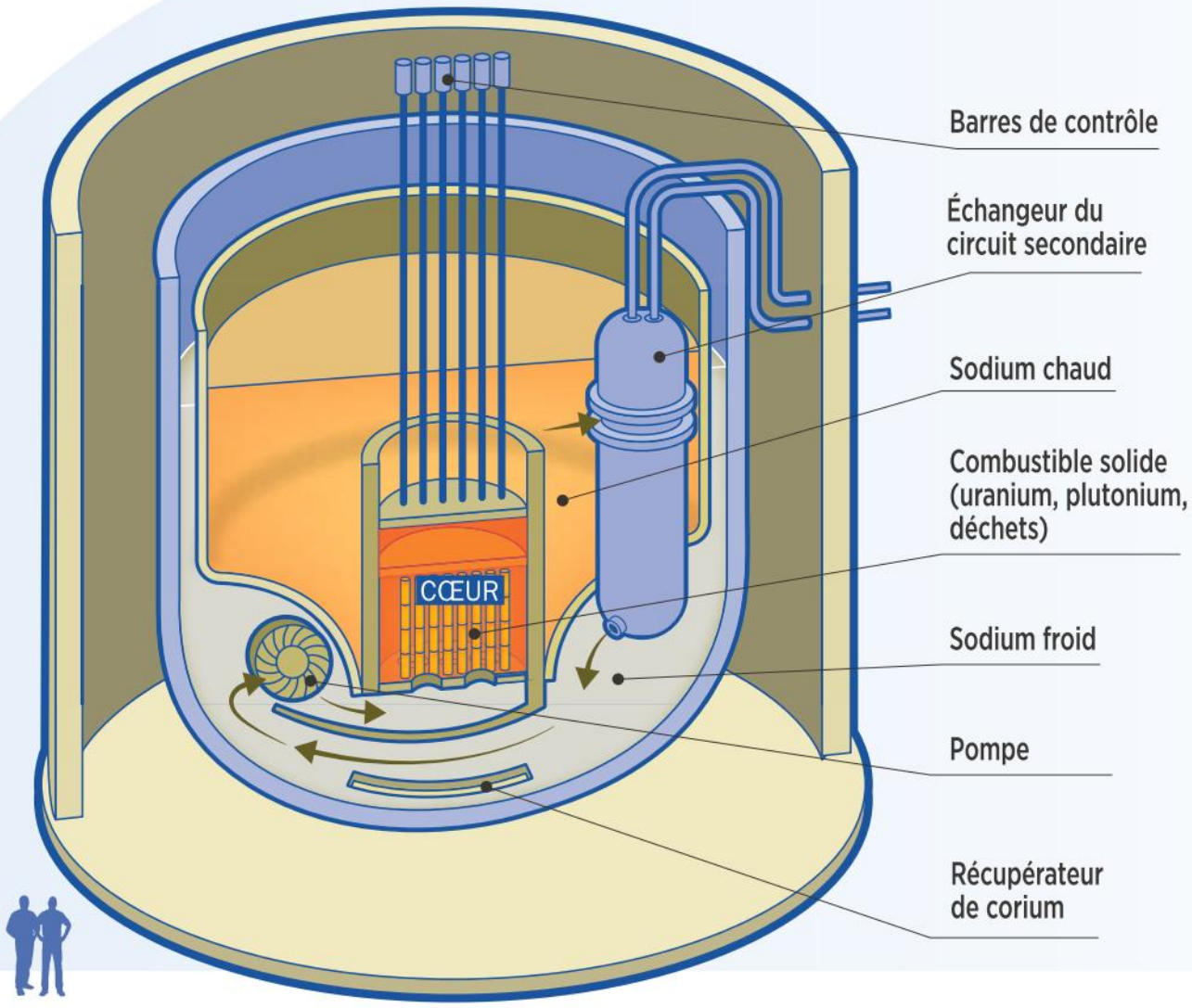


qui ne se transporte pas sur longue distance et se dissipe aux deux tiers quand elle est convertie en électricité. Ainsi, le rendement des SMR peut s'exprimer en mégawatts thermiques (MWt), bien plus élevé que la puissance en mégawatts électriques (MWe). Les petits réacteurs peuvent même se décliner en taille XS, sous les 10 MWe, tel le réacteur eVinci de l'américain Westinghouse, conçu pour générer de 1 à 5 MWe et aisément transportable. L'entreprise vise notamment le marché militaire, pour fournir de l'énergie sur les théâtres d'opérations.

Le M, enfin, désigne la modularité de ces mini-réacteurs, qui peuvent être déployés seuls ou assemblés pour ajouter de la puissance, ce qui permet une flexibilité adaptée aux besoins locaux (gros sites industriels, lieux isolés, production d'hydrogène ou de carburant de synthèse…). Le design du SMR de la start-up française Naarea pourrait ainsi s'appliquer à des réacteurs ultra-compacts de 1 à 40 MWe *(lire p. 113)*. Les plus petits serviraient à la propulsion de cargos et porte-conteneurs ; les plus gros, pourraient, selon Jean-Luc Alexandre, son président, « *fournir de l'énergie à environ 100 000 foyers ou dessaler de l'eau de mer pour alimenter en eau potable une ville d'environ 2 millions d'habitants* ». Variés dans leurs formats et usages, les SMR le sont aussi dans leurs technologies. Beaucoup de projets sont menés par des start-up, qui se sont penchées sur la conception même du réacteur. Pour avancer au plus vite, nombre de concepteurs de SMR ont choisi de miniaturiser la technologie qui équipe aujourd'hui la plupart des centrales

Des réacteurs de taille réduite implantables au plus près des clients





Réacteur à neutrons rapides

Un métal (sodium ou plomb) est utilisé pour transporter – plus efficacement que l'eau – la chaleur créée par fission vers un échangeur, qui réchauffe un gaz utilisé pour produire l'électricité. Le métal sert aussi à refroidir le cœur.

Le plus : la capacité à recycler les déchets, l'utilisation de plusieurs types de combustibles.

Le moins : la quantité importante de plutonium nécessaire pour le faire démarrer.

L'écueil : le passage à l'échelle industrielle. La forte réactivité du sodium.

nucléaires en fonctionnement : le réacteur à eau pressurisée (REP). Le combustible utilisé est l'uranium enrichi. La chaleur émise par la fission nucléaire chauffe à 320 °C de l'eau qui circule autour du réacteur, soumise à une forte pression pour ne pas entrer en ébullition. L'eau absorbe la chaleur et refroidit le cœur du réacteur, afin d'éviter un emballement. Pour produire de l'électricité, l'eau passe ensuite dans un système secondaire, où elle devient vapeur et entraîne une turbine. Mais pas besoin de ce système si on ne veut que générer de la chaleur, par exemple pour les réseaux de chauffage urbain.

Des mini-REP sont déjà en fonctionnement depuis des décennies dans les sous-marins et porte-avions nucléaires américains, français, britanniques et russes. La Russie en dispose aussi pour ses navires brise-glace et pour sa centrale flottante en Sibérie *(lire p. 122)*. Des projets avancés, tels ceux de NuScale aux États-Unis *(lire p. 118)*, de Nuward en France *(lire p. 114)* ou de Smart en Corée du Sud se basent sur cette technologie car elle est déjà éprouvée, connue des autorités de sûreté, et le combustible qu'elle emploie est disponible. Une variante de ce design est mise en œuvre par GE Hitachi pour son BWRX-300, qui devrait démarrer au Canada. Il s'agit du réacteur à eau bouillante (REB), qui laisse l'eau passer à ébullition au cœur du réacteur, alimentant ainsi directement en vapeur la turbine pour produire de l'électricité.

La technologie HTR remplace l'eau par de l'hélium gazeux

Mais les technologies REP ou REB ne permettent pas de répondre à une demande forte de nombre d'industries qui ont besoin de chaleur très élevée et, aujourd'hui, brûlent du charbon ou du gaz. C'est pourquoi certaines start-up ont remis au goût du jour des projets de recherche sur les réacteurs à haute température (HTR), expérimentés dans les années 1960 à 1980 avec les prototypes Dragon au Royaume-Uni, AVR en Allemagne et Peach Bottom aux États-Unis. L'idée est de remplacer l'eau par de l'hélium gazeux sous pression, qui présente une meilleure conductivité thermique *(voir schéma p. 105)*. Un SMR de ce type vient d'être mis en service en Chine *(lire p. 120)*. C'est aussi le système utilisé par le microréacteur eVinci de Westinghouse. En France, la start-up Jimmy développe un HTR de 20 MWt *(lire p. 110)*, « *produisant de la chaleur à 450 °C* », selon son P-DG Antoine Guyot. Avec de plus fortes puissances, on peut atteindre 700 °C.

Ces réacteurs peuvent aussi produire de l'électricité avec une turbine à gaz. Les HTR ont l'avantage de présenter une sûreté intrinsèque, notamment grâce aux propriétés de l'hélium. « *Le cœur du réacteur ne peut jamais atteindre une température à laquelle il pourrait fondre : s'il est perturbé, des contre-réactions l'éteignent et la puissance résiduelle est évacuée naturellement* », assure Antoine Guyot. Seul problème, ces réacteurs ont besoin d'un combustible résistant aux températures élevées, dit Triso. Or les quelques sociétés qui en fabriquent, en Chine et aux États-Unis, en produisent de faibles quantités.

Une autre filière s'attaque, elle, à un problème majeur du nucléaire – ses déchets radioactifs –, qu'elle est capable de recycler : les réacteurs à neutrons rapides (RNR), qui font eux aussi l'objet de recherches depuis les années 1950. Ces neutrons peuvent provoquer des réactions de fission sur un nombre de

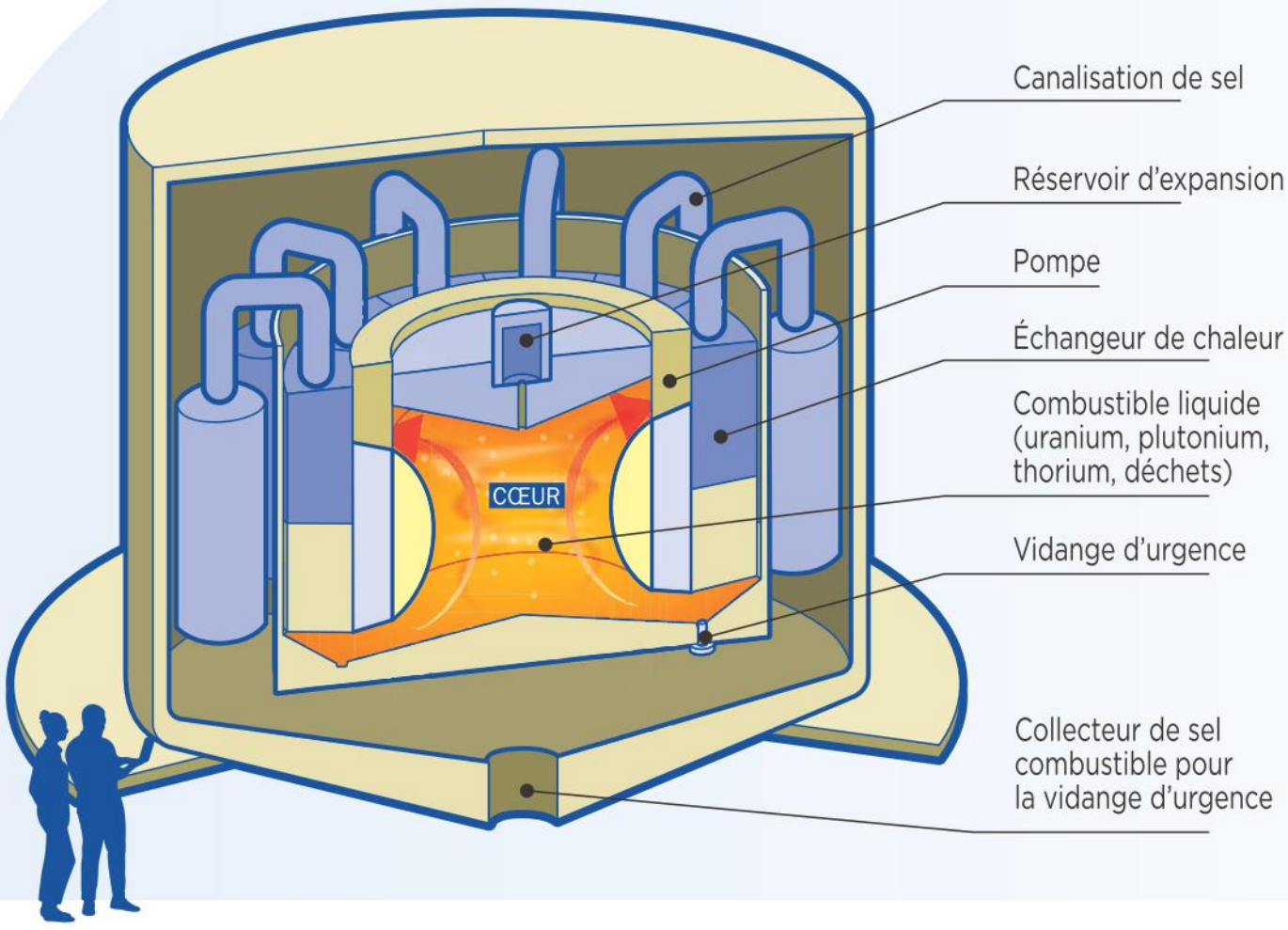
AXINDUS
POWERED BY CAE GROUPE

Solutions de câblage
INTELLIGENTES ET DURABLES
depuis plus de 30 ans

MEMBRE DU Gifen MEMBRE DU MEMBRE DU MEMBRE DU

www.cae-groupe.com

cae GROUPE



Réacteur à sels fondus

La matière combustible est dissoute dans des sels fondus, brûlée sous forme liquide. Le liquide fait le tour de la cuve et traverse les échangeurs de chaleur pour produire de l'électricité. La température s'autorégule sans système refroidisseur actif.

Le plus : la capacité à recycler les déchets, la sûreté, l'utilisation de plusieurs types de combustibles.

Le moins : un procédé appelé à faire ses preuves.

L'écueil : le risque de corrosion des tuyaux par les sels.

noyaux bien plus important que les seuls noyaux dits « fissiles », en particulier les actinides mineurs, déchets nucléaires hautement radioactifs produits dans les centrales actuelles. Impossible d'utiliser de l'eau pour ralentir les neutrons, il faut faire appel à des fluides métalliques liquides, tels le sodium ou le plomb *(voir schéma p. 106)*.

Les États-Unis, le Japon, le Royaume-Uni, l'Inde et la Russie ont fait tourner des prototypes au sodium. La Chine construit un démonstrateur. La Russie dispose même d'un RNR au sodium de 800 MW en exploitation à Beloïarsk (Oural). La France maîtrise bien cette technologie des RNR sodium, mise en œuvre avec ses prototypes Rapsodie et Phénix et surtout le surgénérateur démonstrateur Superphénix, qui a fonctionné pendant douze ans avant d'être mis à l'arrêt en 1997 sur décision politique. Surtout, l'Hexagone possède un atout décisif : il jouit d'une totale indépendance énergétique, puisqu'il dispose de 250 000 tonnes d'uranium appauvri qui pourrait être réexploité. Aux États-Unis, TerraPower, la société de Bill Gates, développe un micro-Superphénix, Natrium *(lire p. 117)*. Mais face aux risques de l'utilisation du sodium liquide, excellent caloporteur mais qui peut s'enflammer au contact de l'air ou de l'eau, certains explorent plutôt la voie des réacteurs refroidis au plomb liquide, dont un prototype est en construction en Russie, et que l'URSS a exploité dans certains de ses sous-marins nucléaires. C'est le cas des start-up italienne Newcleo *(lire p. 112)* et suédoise LeadCold.

Les sels fondus offrent une grande sécurité intrinsèque

Enfin, le concept des réacteurs à sels fondus (RSF) marque une rupture encore plus forte. Cette technologie a été étudiée par le laboratoire d'Oak Ridge aux États-Unis dans les années 1950, qui a construit un réacteur expérimental, en service de 1964 à 1969. Puis elle a été délaissée au profit des REP, déjà exploités commercialement, avant de connaître un regain d'intérêt à partir des années 2000. Là, le combustible nucléaire est utilisé non plus sous forme solide mais liquide, dissous dans des sels (chlorure de sodium, sels fluorés…). Cette « soupe » atteint des températures de 600 à 900 °C, plus élevées que dans les REP, ce qui leur permet d'offrir de la chaleur industrielle mais aussi une efficacité accrue de production d'électricité. Ce système a aussi l'avantage d'être pilotable à la minute. De plus, cette solution offre une très grande sûreté intrinsèque : les sels fondus ont des températures d'ébullition très élevées et une faible pression, ce qui réduit les risques de rupture et de fuite de fluide en cas d'accident. Les sels, chimiquement stables, confinent les produits de fission les plus dangereux, et la chaleur résiduelle s'évacue naturellement *(voir schéma ci-desssus)*. Par ailleurs, ces réacteurs peuvent utiliser plusieurs combustibles, dont ceux issus du thorium, un métal quatre fois plus abondant que l'uranium. Les Danois de Seaborg Technologies misent sur les RSF pour leur projet de mini-centrale nucléaire installée sur barge, tout comme les Canadiens de Terrestrial Energy.

Comble de l'innovation : appliquer la technologie des sels fondus (RSF) sur des réacteurs à neutrons rapides (RNR). C'est le pari de la société française Naarea, qui entend ainsi combiner l'efficacité et la sûreté des sels fondus tout en brûlant des déchets et en recyclant du combustible. Seul souci : le retour d'expérience est faible, ce qui augure d'un gros défi pour faire approuver ce design par les autorités de sûreté. Le nucléaire du futur ? Rendez-vous en 2030 pour voir si ces promesses pourront être tenues. ■

Sylvie Rouat

L’ isogénération interne : vers un nucléaire renouvelable ?

Repenser notre mix énergétique implique de réduire notre dépendance aux énergies fossiles, en tenant compte des enjeux de souveraineté économique et de ré-industrialisation. Un défi relevé par la start-up Stellaria.

Si, dans la course contre la montre dans laquelle le monde est embarqué, le nucléaire va assurément conserver son rôle pivot, il doit aussi se réinventer. Stellaria, start-up co-fondée par le Commissariat à l’Énergie Atomique (CEA) et Schneider Electric, innove avec un réacteur à neutrons rapides à cœur liquide qui présente l’avantage d’être sûr, économique et durable. Une révolution !

Le Stellarium® est un petit réacteur nucléaire modulaire (SMR) produit en série. Cela réduit drastiquement les coûts de fabrication et rend le nucléaire accessible financièrement. L'approvisionnement en énergie est donc garanti à des prix compétitifs et non volatils. Le Stellarium® utilise de l’uranium appauvri ou du thorium – 320 000 tonnes sont aujourd’hui disponibles en France – et permet de recycler d’autres combustibles usagés du parc EDF (uranium et plutonium). Ces réserves représentent 4 000 ans de consommation française et permettent de s'affranchir des mines d'uranium. De plus, le réacteur peut incinérer les déchets les plus dangereux (Actinides Mineurs) et réduire leur dangerosité de 300 000 à 300 ans. Le Stellarium® est économe en métaux et en énergie nécessaires pour sa construction. Le taux de retour énergétique (TRE) de cette technologie dite "à neutrons rapides" est très élevé. Chaque joule investi dans un réacteur permet d’en récupérer 200, un TRE qui permet d'assurer la prospérité durable de notre société aujourd'hui dépendante du pétrole fossile (TRE ~20).

Un procédé unique au monde

Les réacteurs Stellarium® fonctionnent avec un dérivé de sel de table parfaitement stable dans lequel sont dissous les atomes fissiles et fertiles. L’ensemble fonctionne en convection naturelle à haute température grâce à l’énergie dégagée par la réaction de fission. Le Stellarium® est le premier réacteur à neutrons rapides au monde capable de renouveler et de réutiliser son combustible en continu grâce au processus d’isogénération. En effet, chaque atome fissionné (Uranium 235 et Plutonium) permet de transformer un atome fertile (Uranium 238) présent dans le même sel en nouvel atome fissile. Ce faisant, le rechargement n’est nécessaire que tous les 20 ans ce qui minimise les transports de combustible. Un réacteur peut alimenter en électricité une ville de 150 000 habitants ou un data-center géant de manière autonome pendant deux décennies sans production de CO_2 ! L’isogénération interne en continu possède une autre particularité, cette fois-ci en termes de sûreté. Le procédé rend physiquement impossible l’emballement de la réaction en chaîne. L’explication est simple : il n’est tout simplement pas possible de fissionner de la matière qui n’a pas encore été produite !

Des avantages multiples pour les industriels energo-intensifs

L’énergie produite par le réacteur Stellarium® est fiable, économique et sûre. Enterré, il peut être installé en toute sécurité dans une zone industrielle. Les réacteurs de 110 MW sont fournis par paire sur un foncier compact. Le Stellarium® permet de générer de l’électricité mais aussi de la chaleur à haute température ou des molécules (hydrogène, engrais azotés et des carburants de synthèse) afin de faire fonctionner des procédés intensifs en énergie.

Une autre caractéristique essentielle du Stellarium® réside dans son ultra pilotabilité native. Il peut en effet suivre la demande énergétique aussi rapidement qu'une centrale à gaz grâce à la dilatation de son cœur liquide. Cela le rend 6 fois plus réactif qu'un réacteur EDF.

Pour finir, les équipes de Stellaria ont imaginé une installation réparable et durable, le réacteur ayant été conçu pour que chaque composant interne, y compris la cuve, puisse être remplacé.

Pensé par deux acteurs incontournables du secteur de l’énergie pour apporter des solutions renouvelables, pérennes et souveraines, le réacteur à neutrons rapides Stellarium® possède de puissants atouts pour la révolution industrielle décarbonée dont la France et l’Europe ont besoin sans tarder.

www.stellaria-energy.com

De gauche à droite : **Guillaume Campioni** (Founder & Chief Nuclear Officer), **Lucas Tardieu** (Co-founder & Lead Architect), **Nicolas Breyton** (Founder, CEO and Product Owner).

Les start-up font assaut d'innovations

Sept jeunes pousses françaises ont déjà bénéficié du plan d'investissement gouvernemental France 2030 doté de 1 milliard d'euros.
Tour d'horizon des futurs champions du marché émergent des petits réacteurs.

Contrairement aux gros réacteurs de plus de 1 gigawatt (GW), les petits réacteurs (SMR en anglais), dix à cent fois moins puissants, rendent le nucléaire accessible aux start-up et aux investisseurs privés. Partie en retard, la France met désormais les bouchées doubles. Ainsi, l'État a alloué 1 milliard d'euros au petit nucléaire dans le cadre du plan France 2030. La somme reste modeste en comparaison des sommes dépensées par les Américains *(lire p. 116)*, et la moitié est allouée à la filiale d'EDF Nuward *(lire p. 114)*. Le reste relève donc du coup de pouce au démarrage… mais crucial pour établir une crédibilité et avoir accès au soutien technique clé du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Sept jeunes pousses en ont bénéficié, *« et deux autres seront labellisés rapidement »*, indique Massimiliano Picciani, de la banque publique Bpifrance, pilote du plan. Mais la France a une longue expérience de l'atome : des chercheurs ressortent des cartons des projets issus de décennies de recherche, les équipes comptent des ingénieurs chevronnés.

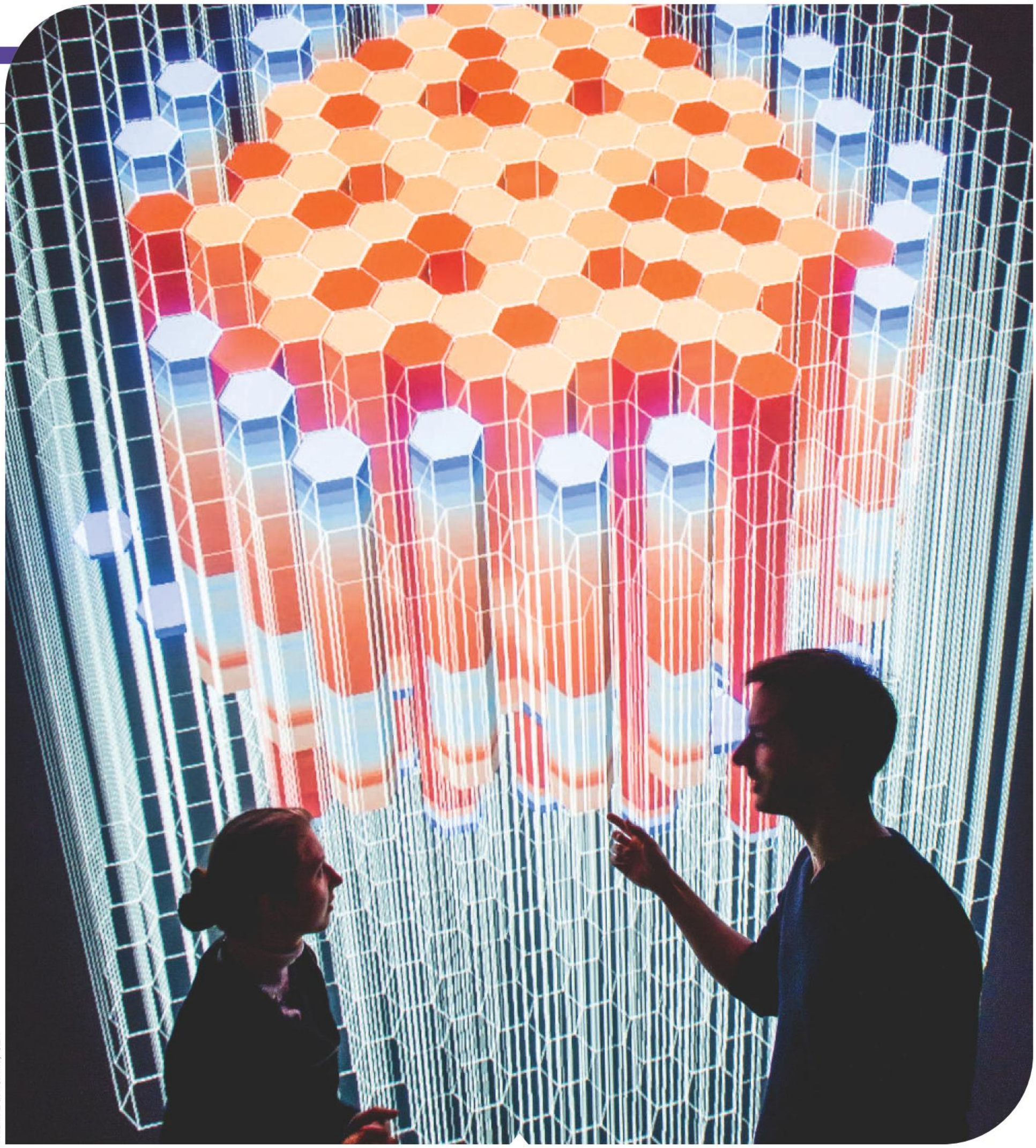
Certaines jeunes pousses misent sur des technologies éprouvées, avec l'objectif d'aller au plus vite, d'autres travaillent sur des technologies de rupture, espérant ainsi mieux régler le problème des déchets nucléaires, et produire de l'énergie moins chère. Toutes affirment avoir un niveau de sûreté « par nature » grâce à leurs technologies et à leur petite taille. Mais toutes ne sont encore que des modélisations sur ordinateur, lancées dans la course aux levées de fonds, qui devront surmonter des obstacles techniques, juridiques, financiers et sociétaux. *« La certification par le régulateur sera une étape critique*, expose Sébastien Israël, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). *Les concepteurs devront démontrer la fiabilité et la sûreté de leurs réacteurs avant de recevoir l'autorisation de construction »*, processus qui prendra des années. Dans un contexte concurrentiel, sur un marché émergent dont le modèle économique reste à valider *(lire p. 98)*, ces sept nains des SMR ne survivront pas tous. Zoom sur ces lauréats de France 2030.

Jimmy

Puisssance : 20 MW thermiques
Usages : chaleur industrielle pour l'agroalimentaire, la papeterie, la chimie
Mise en service annoncée : 2026
Fonds levés : 52 millions d'euros

C'est en écoutant l'argumentaire de l'ingénieur écologiste pronucléaire Jean-Marc Jancovici *(lire encadré p. 113)* qu'Antoine Guyot, polytechnicien de 30 ans, secondé par Mathilde Grivet, 29 ans, diplômée de HEC, a fondé la start-up Jimmy en 2021. Son objectif : produire de la chaleur (jusqu'à 450 °C) au service des industries qui, jusqu'ici, utilisent du gaz ou du fioul. *« C'est un créneau utile pour l'environnement et rentable : ces entreprises n'ont pas de source de chaleur alternative décarbonée compétitive, les grosses centrales ne répondent pas à cette demande car la chaleur doit être fournie localement. En n'ayant pas besoin d'équipements pour convertir la chaleur en électricité, et en économisant sur les coûts de génie civil avec notre chaudière compacte, on peut être gagnant par rapport au gaz »*, assure Antoine Guyot, soit un prix autour de 40 euros le MWh thermique. Il estime le marché potentiel à 500 à 800 générateurs en France, 2 500 à 4 000 en Europe.

Pour *« aller à l'industrialisation le plus vite possible »*, Jimmy *« recopie ce qui a déjà marché »* : les réacteurs à haute température (HTR, *lire p. 105*) ont été testés depuis vingt ans en France en R&D (programmes Antares, Raphael, Archer, Gemini), et le combustible Triso (uranium extra-enrichi, en billes), utilisé dans le SMR en fonctionnement en Chine *(lire p. 120)*, est déjà homologué aux États-Unis. *« Le Triso résiste à des températures de 1 600 °C, alors que la température ne dépassera pas 800 °C, donc cela supprime tout risque de fusion de cœur »*, précise le P-DG. En optant



PHILIPPE STROPPA / CEA

Le CEA, qui a essaimé ses propres jeunes pousses, dispose d'une expertise dans la simulation des réacteurs à neutrons rapides.

pour ces technologies déjà existantes, Jimmy se passe de prototype et espère pouvoir raccourcir le délai pour obtenir une licence, qu'il estime de quatre ans. Sans attendre, l'entreprise de 60 personnes a commandé des pièces et signé avec un premier client dans l'agroalimentaire, qui devrait annoncer en mars le projet d'implantation sur son site dans la région Grand Est. Jimmy prévoit une tête de série en 2026, et estime qu'il lui suffira de 200 millions d'euros pour monter sa filière. Après avoir levé environ 20 millions auprès d'investisseurs privés (Eren, Otium, Noria, Serena, Omnes), la start-up a obtenu 32 millions de France 2030. Restent des difficultés liées au combustible : le Triso n'a encore jamais été certifié en France, son enrichissement élevé coûte cher, et son approvisionnement devra venir *« de l'étranger »*.

Calogena

Puissance : 30 MW thermiques
Usages : chauffage urbain
Mise en service annoncée : 2030
Fonds levés : 5,2 millions d'euros

Spécialisé dans la robotique, les drones et l'impression 3D, le groupe familial Gorgé (3 500 salariés, 500 millions d'euros de chiffre d'affaires), également fournisseur d'EDF dans le nucléaire, a décidé de se lancer dans les SMR. *« Nous avons* ▶

NEWCLEO

En 2021, Stefano Buono (à gauche) a cofondé la start-up Newcleo avec l'ingénieur Luciano Cinotti et la physicienne Élisabeth Rizzotti.

STEFANO BUONO, COFONDATEUR DE NEWCLEO

« Avec de petites unités en mode standardisé, on peut être très compétitif »

À 58 ans, Stefano Buono a déjà fait fortune dans le nucléaire. Physicien disciple du Prix Nobel italien Carlo Rubbia au Centre européen de recherche nucléaire (Cern), il y a essaimé une biotech de médecine nucléaire, Advanced Accelerator Applications (AAA), vendue en 2017 pour 4 milliards de dollars à Novartis. En 2021, il a cofondé Newcleo avec l'ingénieur Luciano Cinotti et la physicienne Élisabeth Rizzotti. La start-up de près de 600 personnes, installée à Lyon, Avignon et à Turin en Italie, a levé déjà 400 millions d'euros auprès de riches familles italiennes, dont les Agnelli, et reçu 15 millions d'euros dans le cadre de France 2030. Elle boucle une nouvelle levée de 1 milliard d'euros.

Vous développez un réacteur à neutrons rapides au plomb, quels en sont les avantages ?

Stefano Buono. Les réacteurs à neutrons rapides, comme l'était Superphénix en France, peuvent recycler la matière nucléaire combustible de multiples fois. Au lieu d'être un déchet dangereux, le combustible usagé des centrales devient une matière valorisable. Et rien qu'avec le stock existant en France, on peut produire notre électricité pendant mille ans ! Quant au plomb, l'URSS en utilisait déjà dans les réacteurs de ses sous-marins. Après la chute du mur, il y a eu des échanges entre Russes et Européens, et la R&D sur cette filière a progressé sans bruit. L'intérêt du plomb liquide, par rapport au sodium qu'utilisait Superphénix, c'est qu'il n'y a pas de risque chimique, ce qui permet de simplifier la machine et de la rendre moins chère. Les caractéristiques du plomb rendent aussi le système plus sûr. En cas de problème, notre conception permet au réacteur de s'éteindre tout seul, sans qu'une intervention humaine soit nécessaire.

Quels seront les usages ?

La demande d'électricité va doubler, voire tripler en Europe d'ici 2050. Or les SMR proposent une électricité décarbonée, fiable, pilotable, avec une flexibilité que n'ont pas les grosses centrales : ils peuvent se construire vite et s'assemblent en groupe selon la puissance désirée. Les nôtres peuvent servir à produire de l'hydrogène et autres carburants durables, pour la cogénération ou pour remplacer les centrales à charbon ou à gaz, polluantes.

Combien coûtera votre réacteur ?

En construisant de petites unités en mode standardisé, on peut être très compétitif. En France, nous investirons 3 milliards d'euros pour y construire notre tête de série et notre usine à combustible, car les industriels du secteur ne sont pas en mesure de nous fournir assez vite. En rythme de croisière, nos unités coûteront environ 800 millions d'euros, pour un prix de l'électricité de 50 à 70 euros le MWh.

Où en êtes-vous dans le processus d'autorisation réglementaire ?

Afin d'accélérer, nous tenons des réunions mensuelles avec l'Autorité de sûreté nucléaire. Après l'été 2024 s'ouvrira une phase de deux ans qui conduira à une demande officielle d'autorisation. Déjà, nous prospectons en France pour trouver un terrain d'ici au printemps. Nous visons 2030 pour la mise en service de notre tête de série, puis 2033 pour celle du premier réacteur commercial. En France, nous entendons exploiter une vingtaine de réacteurs sur cinq sites en 2050 ■

Propos recueillis par Denis Delbecq

Newcleo

Puissance : 200 MW électriques
Usages : Remplacement centrales charbon et gaz, production d'hydrogène
Mise en service annoncée : 2030
Fonds levés : 415 millions d'euros

à la fois la taille suffisante pour soutenir un tel projet complexe de long terme et la capacité à rester agiles comme une start-up », affirme Raphaël Gorgé, 52 ans, ingénieur chimiste de formation. Son objectif : produire de la chaleur décarbonée autour de 100 °C pour alimenter des réseaux de chauffage urbain. Calogena, créée en 2022, mise sur la technologie classique du réacteur à eau, utilisant le même combustible uranium que les grosses centrales mais avec une eau bien plus faiblement pressurisée : *« Le réacteur sera plongé dans une piscine, enfoui en sous-sol. Comme il y a peu de pression, pas de circuit de vapeur, il n'y a pas de risque d'explosion.* » Le mini-réacteur peut chauffer 12 000 foyers et l'entreprise *« compte installer ces chaufferies à 10 ou 20 kilomètres des villes, là où on trouve déjà les sites industriels »*. Le groupe Gorgé vise surtout l'export, notamment *« l'est et le nord de l'Europe, où il y a plus de réseaux de chaleur »* encore à 60 % alimentés par des énergies fossiles. Calogena prévoit un coût de 200 à 300 millions d'euros pour la tête de série. Ses réacteurs devraient coûter 100 millions l'unité, le prix de la chaleur est estimé à 60 euros le MWh thermique. Le groupe Gorgé finance sa filiale, qui a reçu 5,2 millions d'euros de France 2030, et compte déposer sa demande d'autorisation d'exploitation au second semestre de cette année. Elle prévoit de démarrer la construction de sa tête de série en 2029.

Naarea

Puissance : 40 MW électriques / 80 MW thermiques
Usages : chaleur industrielle, électricité pour l'industrie et les lieux isolés
Mise en service annoncée : 2030
Fonds levés : 62,5 millions d'euros

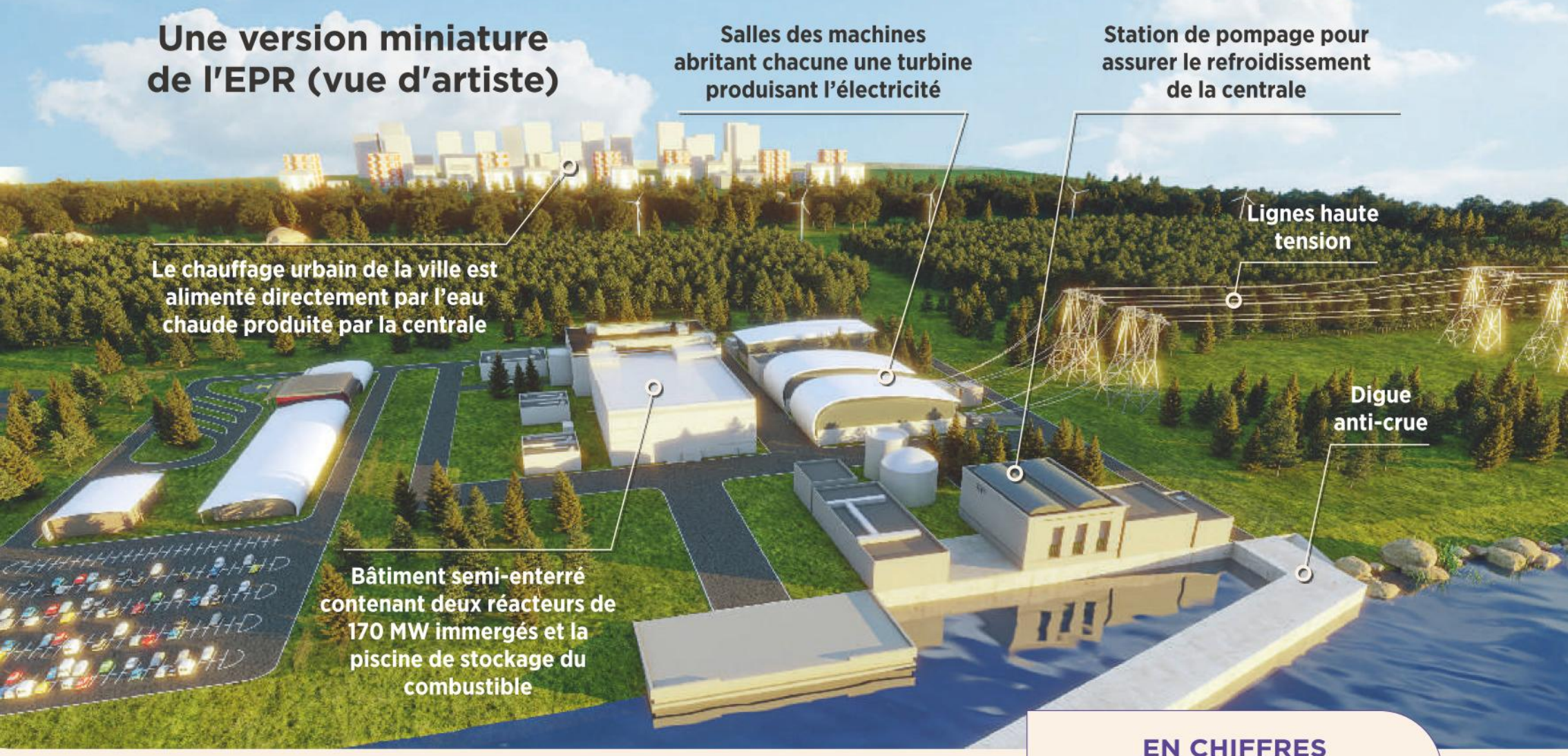
Fondée en 2020 par les ingénieurs Jean-Luc Alexandre (ancien d'Alstom) et Ivan Gavriloff (conseil en innovation Kaos), Naarea voit grand. La société mise sur une double innovation : celle des neutrons rapides, que la France est la seule – avec la Russie – à maîtriser, associée à celle des sels fondus dans lesquels le combustible, liquide, est mélangé, technologie développée aux États-Unis dans les années 1950 et redécouverte il y a quinze ans. Le tout dans des micro-réacteurs qui entrent dans un container. L'enjeu de R&D est élevé mais Jean-Luc Alexandre revendique ces choix : *« Grâce aux neutrons rapides, on peut brûler le combustible usagé des grandes centrales et donc apporter une solution au problème épineux des déchets radioactifs, tout en assurant notre indépendance énergétique. Et les sels fondus sont la méthode la plus efficace de combustion, et aussi la plus sûre : la réaction de fission s'autorégule, car en cas d'échauffement, les sels se dilatent et font redescendre la température. Enfin, grâce à ce format ultra-compact, nos réacteurs peuvent être installés partout, sans besoin d'être à côté de l'eau, sur une simple dalle de béton ; et pour plus de puissance, il suffit d'en aligner cinq, dix, vingt… »*
Grâce à cette modularité, Naarea vise toute la palette des usages des SMR, produisant chaleur (jusqu'à 650 °C) ou électricité au plus près des clients : le transport vert (rechargement de batteries pour les bus, camions, voitures, propulsion de gros cargos), la production d'hydrogène, la chaleur pour décarboner les procédés industriels, le dessalement d'eau de mer, le remplacement des groupes électrogènes au fioul, des centrales à charbon ou à gaz… Le business plan est très ambitieux. Ainsi, à maturité, Naarea prévoit que ses réacteurs coûteront moins de 10 millions d'euros l'unité, grâce à une production en série de 400 exemplaires par an, et pourront produire une électricité à un prix imbattable de 55 euros le MWh. Bien moins cher que les énergies fossiles, les renouvelables ou encore le « gros nucléaire ». La start-up projette un prototype opérationnel dès 2028 pour une commercialisation en 2030, après avoir construit deux usines pour la fabrication et le combustible. Encore faut-il que tout aille vite et bien avec l'Autorité de sûreté nucléaire, qui n'a jamais

RECRUTEMENTS

L'effet Jancovici joue à plein

BRUNO LEVY /DIVERGENCE-IMAGES

Plus de 100 000 techniciens et ingénieurs, du CAP au Bac + 5, sur la décennie à venir : le besoin de recrutements dans le nucléaire est considérable, selon le syndicat professionnel du secteur… qui ne compte même pas les embauches des fabricants de petits réacteurs. La filière s'est organisée, avec notamment l'Université des métiers du nucléaire (UMN), créée en 2021 pour faire le pont entre les groupes du secteur et les établissements de formation. Ayant longtemps souffert d'une mauvaise image, la filière attire de nouveau les étudiants, séduits par les perspectives mais aussi par l'argument écologique : l'énergie atomique émet très peu de gaz à effet de serre, moins même que les renouvelables. Sur ce point, le polytechnicien concepteur du bilan carbone Jean-Marc Jancovici *(photo)* est le meilleur des agents recruteurs. Ses cours et conférences dans les écoles d'ingénieurs, ses vidéos sur YouTube – certaines vues plus de 1,5 million de fois –, sa BD best-seller *Le Monde sans fin,* vendue à plus de 850 000 exemplaires, font de lui un militant proclimat et pronucléaire pédagogique et percutant.
« Il a un écho certain auprès des jeunes sensibilisés à la cause climatique et qui veulent faire partie de la solution », **estime Hélène Badia, présidente de l'UMN. De fait, les formations spécialisées font le plein, et Orano a reçu deux fois plus de CV en 2023 qu'en 2019.**



AMBITION

Nuward, le rejeton d'EDF, se pose en leader européen

La filiale de l'électricien public vise le marché du remplacement des milliers de centrales à charbon. Un premier démonstrateur est prévu pour 2030.

Le chantier maudit de l'EPR de Flamanville – 1 630 mégawatts (MW) –, toujours en cours au bout de seize ans, a montré à EDF que la course à la taille n'est pas toujours la voie pour un nucléaire compétitif. L'électricien public travaille donc aussi depuis 2019 sur un projet d'un réacteur version miniature de l'EPR, au design simplifié, de 170 MW, fonctionnant par paires, soit la puissance des centrales à charbon ou à gaz qu'il a vocation à remplacer. Nuward est conçu en association avec TechnicAtome et Naval Group, experts en mini-chaudières pour la propulsion nucléaire des sous-marins et porte-avions, mais aussi avec le groupe d'ingénierie Tractebel et le CEA. En misant sur la technologie classique du réacteur à eau pressurisée, le consortium espère aller vite : *« Nous profitons de l'expérience acquise, de spécifications déjà connues des autorités de sûreté et d'une filière établie d'approvisionnement du combustible,* explique Renaud Crassous, président exécutif de Nuward. *Le tout avec le meilleur standard de la troisième génération, une sûreté et une sécurité renforcées.* » L'État a accordé à ce porte-drapeau des petits réacteurs (SMR en anglais) français 500 millions d'euros dans le cadre du plan France 2030, pour un coût de développement de l'ordre du milliard d'euros. Une première étape vers la certification a été franchie en septembre, après la revue conjointe des options de sûreté réalisée conjointement par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et ses homologues finlandais et tchèque. Le premier site d'implantation – en France, dans une zone où il y a une centrale – devrait être choisi en février. Le chemin pour l'autorisation complète est encore long – au moins quatre ans. Il s'agit de lancer le chantier d'un premier démonstrateur en 2030, qui doit être mis en route en

EDF/NUWARD

EN CHIFFRES

2 réacteurs
PUISSANCE ÉLECTRIQUE
2 X 170 MW
PUISSANCE THERMIQUE
2 X 540 MW

76
Nombre d'assemblages de combustible

< 5 %
Taux d'enrichissement du combustible, dioxyde d'uranium (UO_2)

40 mois
Durée de construction

60 ans
Durée de fonctionnement minimum

2030
Début de la construction

2035. Nuward n'est pas en avance face aux Américains, qui viennent chasser en Europe *(lire p. 116)*. Mais, selon Renaud Crassous, *« si nous tenons notre calendrier, nous sommes bien placés : Nuward est le projet le plus avancé dans l'UE et a pour ambition de devenir le leader européen »*, visant plusieurs dizaines de SMR d'ici 2050. Pour y arriver, encore faut-il être compétitif sur les prix. Une paire de Nuward devrait coûter 1 milliard d'euros.

Il y a plus de 3 000 centrales à charbon à remplacer dans les pays acceptant le nucléaire, *« si l'on veut y parvenir, il faudra produire avec un coût du MWh électrique entre 70 et 100 euros. Nous n'atteindrons pas ce tarif pour les premiers exemplaires, mais nous misons sur l'effet de série pour le faire baisser, la construction en usine permettra de sortir plusieurs SMR par an. Après tout, l'éolien offshore et le photovoltaïque étaient très chers au début »*. À condition que les gendarmes du nucléaire nationaux se coordonnent pour ne pas avoir à recommencer chaque fois tout le processus de certification.

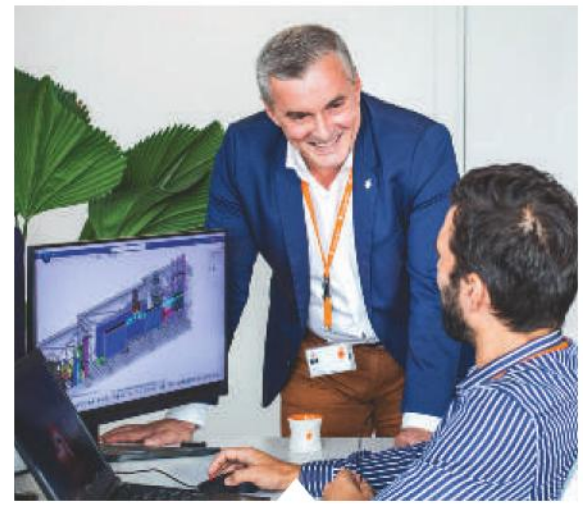
Et à condition surtout d'intéresser suffisamment de clients. *« Plusieurs d'entre eux ont déjà manifesté leur intérêt en Finlande, en Suède, en République tchèque et au Royaume-Uni. »* Mais Nuward voit aussi des perspectives dans l'Hexagone, où des industriels projettent d'en installer sur leurs sites pour disposer d'électricité et chaleur décarbonées pilotables et à coût stable. Reste que le timing est crucial pour prendre des marchés. *« Les processus de décision sont lents au sein de cet attelage de grands groupes, d'autant qu'EDF est déjà confronté au défi titanesque de livrer six nouveaux EPR d'ici 2050 »*, glisse le dirigeant d'une start-up de SMR. À voir si l'électricien tricolore saura démentir sa mauvaise réputation de déraper sur les délais. ■ **Philippe Pajot**

jusqu'ici eu à se plonger dans les spécifications d'un réacteur de ce type. Mais Jean-Luc Alexandre est confiant : avec ses 140 salariés, dont des vétérans de Phénix et Superphénix et du projet Astrid (les ex-réacteurs à neutrons rapides expérimentaux français), *« nous avançons vite : nous avons ainsi déjà achevé le "jumeau numérique" du réacteur en juillet, une modélisation très détaillée du système qui participera à la démonstration de sûreté »*. Depuis septembre, l'entreprise teste aussi son premier circuit à sels fondus, utilisant une céramique pour prévenir toute corrosion, qui devra démontrer sa bonne résistance. Pour finaliser ses développements, passer le cap des autorisations et construire ses usines, le P-DG estime que *« l'investissement se montera à 2 milliards d'euros »*. Après avoir levé 50 millions de fonds privés (Eren…) et reçu 12,5 millions de France 2030, Naarea prévoit de lever 150 millions ce premier semestre.

Et aussi…

Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) a essaimé ses propres start-up, issues de la R&D de ses chercheurs. France 2030 a soutenu chacune d'entre elles à hauteur de 10 millions d'euros pour des projets prévoyant d'aboutir autour de 2035.

Ainsi **Blue Capsule,** créée en 2022, développe comme Jimmy un réacteur à haute température (HTR) utilisant du combustible Triso de 150 MW thermiques, pour fournir de la chaleur à 700 °C. Elle vise la production d'hydrogène ou d'ammoniac, et des usages industriels à très forte chaleur comme la métallurgie ou le verre. *« Ces réacteurs seront installés sous terre, sur de gros sites de production,* expose le patron Édouard Hourcade. *Nous en avons recensé 100 à 200 en Europe. »* Le prix visé est de 50 euros le MWh. Un prototype non nucléaire doit être construit à Fos-sur-Mer. Blue Capsule se positionne en fournisseur de technologie mais pas comme exploitant. La start-up est en train de lever 2,5 millions d'euros de fonds privés.



MARTA NASCIMIENTO/RÉA/NAAREA

Jean-Luc Alexandre, P-DG de Naarea qui compte 140 collaborateurs.

De leur côté, **Otrera**, fondée en février 2023, et Hexana, lancée en mars, capitalisent toutes deux sur la filière française des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (Phénix, Superphénix, Astrid), permettant de brûler le combustible usagé des centrales existantes. La première veut proposer des réacteurs de 180 MW thermiques fournissant une chaleur à 100 à 180 °C pour des usages industriels. Elle boucle une levée de fonds d'environ 2 millions. d'euros *« Nous exploiterons nous-même notre tête de série. En revanche, nous construirons et installerons nos réacteurs de série, mais nous les vendrons à des exploitants »*, indique le P-DG d'Otrera Frédéric Varaine.

Hexana, elle, travaille sur un système de deux réacteurs de 400 MW thermiques ou 150 MW électriques qui alimenteraient une unité de stockage de chaleur via des réservoirs de sels fondus. Ceux-ci *« permettront de découpler les pics de consommation du rythme de production des réacteurs, pour fournir de l'électricité ou de la chaleur à la demande »*, précise le patron Sylvain Nizou. L'entreprise table sur un prix de 60 euros le MWh électrique et au moins deux fois moins pour le MWh thermique. Elle espère lever 5 millions d'euros en janvier. ■

Denis Delbecq

Transportable dans un camion, le petit réacteur de Nano Nuclear affichera une puissance de 0,5 MW.

NANO NUCLEAR ENERGY

Les Américains misent gros sur le petit nucléaire

Outre-Atlantique, les projets foisonnent, qu'ils soient portés par des géants du nucléaire, comme Westinghouse, ou par des start-up séduites par la promesse de marchés porteurs. Avec quelques grandes figures de la tech en porte-drapeaux.

Bill Gates en est persuadé : *« Si nous voulons vraiment éviter la catastrophe climatique, nous avons besoin du nucléaire, le seul moyen de se procurer de l'énergie décarbonée 24 h sur 24 et 7 jours sur 7, pour réduire à zéro les émissions en Amérique. »* Pour Sam Altman, le *« père »* de ChatGPT, *« les deux ingrédients d'un avenir prometteur sont l'abondance d'intelligence et d'énergie »* et le nucléaire est la réponse à *« une demande urgente de tonnes et de tonnes d'énergie bon marché et propre »*. Quant à Elon Musk, il loue une énergie *« extrêmement sûre »* et affirme, toujours dans un esprit de provocation, que *« pour ceux qui pensent qu'il y a un risque de radiation, choisissez le pire endroit. Je m'y rendrai et je mangerai des produits locaux devant les caméras de télévision ! »*

Les milliardaires de la tech sont tous fans de l'atome. Et pour cause, l'empreinte carbone du numérique, qui représente près de 4 % des émissions mondiales de gaz de serre, devrait tripler d'ici 2050, à cause de l'explosion des usages. *« Une requête sur ChatGPT requiert dix-sept fois plus d'énergie qu'une requête sur Google »*, note ainsi Christophe Bianchi, directeur technique de l'éditeur de logiciels américain Ansys. Il faut dire que par

SVEN HOPPE/ZUMA-REA

SAM ALTMAN, OKLO

Un réacteur ultra-compact

En 2013, Sam Altman (OpenAI) a fondé Oklo, avec pour co-investisseurs d'autres stars de la Silicon Valley comme Peter Thiel (PayPal) et Dustin Moskovitz (Facebook). La société conçoit un micro-réacteur à neutrons rapides refroidi au métal liquide de 15 MW, Aurora, ultra-compact. Le concept est encore à un stade préliminaire et l'agence de régulation du nucléaire a refusé en 2022 un permis de construction d'un prototype pour défaut d'informations sur la sûreté. Oklo souhaite vendre ses Aurora à un coût unitaire inférieur à 60 millions de dollars.

nature, les stars de la tech sont plutôt « techno-solutionnistes » que portées sur la sobriété. Car l'*American way of life* est et devrait rester très énergivore. Voilà pourquoi, au pays des paris technologiques fous, le nucléaire – qui fournit aujourd'hui environ 20 % de l'électricité du pays – connaît un spectaculaire retour en grâce depuis une bonne décennie, avec un bouillonnement de start-up qui se lancent dans l'aventure des petits réacteurs modulaires (SMR en anglais).

Symbole de ce retournement de situation, l'électricien public local de l'État de Washington, Energy Northwest – pourtant mis en faillite en 1983, laissant une ardoise de 2,25 milliards de dollars liée aux dérives de délais et de budget dans la construction d'une centrale nucléaire –, soutient aujourd'hui X-energy, une start-up qui conçoit un réacteur à haute température refroidi au gaz de 200 mégawatts thermiques (MWt) pour la production de chaleur. Le géant de la chimie Dow prévoit déjà d'en installer quatre unités, en construction dès 2026 sur son site texan, afin de fournir de la chaleur industrielle.

Les projets foisonnent. Dans toutes ces technologies, on retrouve d'abord celle, éprouvée, du réacteur à eau pressurisée. C'est aussi vrai dans les innovations de nouvelle génération, à haute température, à neutrons rapides, à sels fondus *(lire p. 104)*. La gamme des puissances est

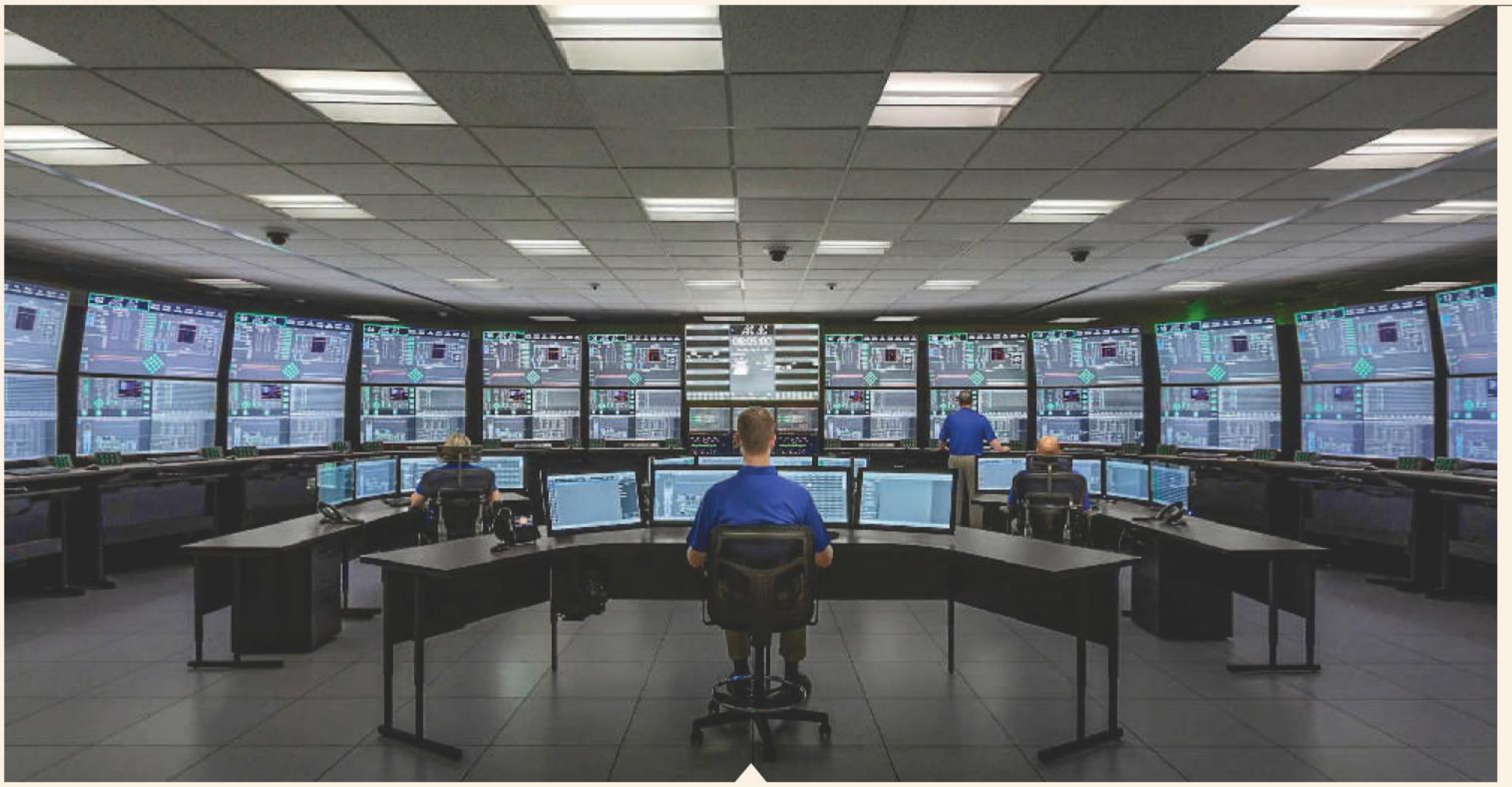
JEENAH MOON/THE NEW YORK TIMES/RÉA

BILL GATES,
TERRAPOWER

Une alternative à l'éolien et au solaire

Dès 2006, Bill Gates a créé TerraPower, qui conçoit notamment Natrium, un SMR de 345 MW à neutrons rapides refroidi au sodium, associé à un système de stockage à sels fondus lui permettant de fournir de la puissance à la demande pour compenser l'intermittence des énergies solaire et éolienne. La société investit 4 milliards de dollars pour un premier réacteur pilote attendu en 2028… mais le projet est en suspens car c'est la Russie qui devait lui fournir le combustible.

GETTY IMAGES, QUENTIN HOUDAS/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR



PHOTOS: NUSCALE

Dès 2012, NuScale a montré son expertise en matière de sûreté avec la mise en service d'un simulateur de salle de contrôle inédit.

IMPLANTATIONS

NuScale, un revers et ça repart

Coup dur pour la start-up pionnière du nouveau nucléaire américain. Le 8 novembre, NuScale a annoncé l'abandon de son projet le plus avancé, lancé il y a déjà dix ans, de livrer à un collectif de municipalités de l'Idaho une centrale électrique composée de six SMR à eau pressurisée de 77 MW plongés dans une piscine géante. En cause, l'inflation des coûts pour un prototype qui a pris des années de retard, faisant grimper le prix attendu de l'électricité à 89 dollars le MWh, selon la dernière estimation, soit plus de 53 % en deux ans. NuScale est la première entreprise occidentale à avoir obtenu une certification de son concept de SMR par le régulateur américain du nucléaire, la NRC, il y a un an, pour une version initiale moins puissante – 50 MW. Mais pour la version à 77 MW, il lui faudra attendre encore deux ans alors que, pour obtenir sa licence, elle a déjà dû dépenser 500 millions de dollars pour constituer un dossier de sûreté de 2 millions de pages!

large : de 300 MW (GE Hitachi, NuScale, Westinghouse), de la taille d'un entrepôt, à 0,5 MW (Nano Nuclear), transportable dans un camion. Parmi les plus avancés, des grands groupes comme le consortium américano-japonais GE Hitachi (réacteur à eau bouillante) qui a signé son premier contrat commercial, avec l'électricien canadien OPG, pour une mise en service attendue dès 2029. La Pologne en a déjà retenu au moins dix, il intéresse aussi la Suède et le Royaume-Uni. Ou l'opérateur historique des centrales américaines Westinghouse, qui développe une version XS, après avoir connu quelques déboires avec le troisième réacteur XXL de la centrale de Votgle en Géorgie, connectée en mars dernier après sept ans de retard et un surcoût de 17 milliards de dollars.

Mais certaines start-up sont aussi en pointe, telles X-energy, la doyenne NuScale *(lire ci-dessus)*, Last Energy (eau pressurisée, 20 MW), Holtech (eau pressurisée, 160 et 300 MW), TerraPower, portée par Bill Gates *(lire p. 117)*, et Oklo, lancée par Sam Altman *(lire p. 116)*. C'est vrai aussi au Canada, avec Terrestrial Energy (eau pressurisée, 195 MW) et Moltex (réacteur à sels fondus incinérateur de déchets nucléaires, 300 MW). Comme nous sommes en Amérique, ces pionniers ont reçu de gros apports de capitaux. Fluor, le géant du BTP qui a pris le contrôle de NuScale en 2011, a injecté plus de 600 millions de dollars dans l'aventure. TerraPower a levé plus de 750 millions, Oklo espère une introduction en Bourse en 2024, qui lui apportera 500 millions. S'ajoute à cet argent privé celui de l'État, généreux. Dans le cadre de l'Inflation Reduction

Les collectivités ont préféré arrêter les frais. Pas de quoi refroidir le PDG John Hopkins : *« Une fois que vous êtes sur un cheval mort, vous en descendez rapidement et changez de monture.* » Selon lui, ce projet avorté a été *« une formidable réussite pour acquérir de nouvelles compétences* » et NuScale conserve *« cinq ans d'avance* » sur ses concurrents, souligne le patron, qui insiste sur la *« bonne santé financière de l'entreprise* ». Même volontarisme au département de l'Énergie : *« Les déploiements inédits peuvent se révéler difficiles mais nous avons absolument besoin d'une technologie nucléaire avancée pour atteindre nos objectifs ambitieux d'énergie propre.* »

Depuis les débuts, en 2007, de cette start-up cotée en Bourse de 560 salariés basée dans l'Oregon, c'est l'histoire du réacteur à moitié vide ou à moitié plein. D'un côté, ceux qui estiment que cette société possède l'expérience, la technologie et les moyens nécessaires pour devenir la première *success story* du petit nucléaire ; de l'autre, ceux qui pensent qu'elle n'est qu'une suite de promesses exagérément optimistes non tenues. *« Ils doivent signer des contrats avec de nouveaux clients pour générer des revenus,* note Neil Kalton, analyste à la banque Wells Fargo. *Sinon, il leur reste environ une année de trésorerie.* » *« Ils seront certes à court de cash s'ils n'ont pas davantage de recettes, mais si les projets en cours progressent, l'argent devrait rentrer* », tempère Marc Bianchi, de TD Cowen.

NuScale a dû renoncer à son projet de mini-centrale dans l'Idaho, destiné à approvisionner 50 communes de l'Utah voisin en électricité à partir de 2029.

En effet, la société compte une douzaine projets à travers le monde, de la Caroline du Nord à la Pennsylvanie en passant par la Corée du Sud, la Pologne et la Roumanie. NuScale fonde beaucoup d'espoirs sur ces deux derniers pays, qui souhaitent implanter des réacteurs dans d'anciennes mines de charbon. En mai dernier, le département de l'Énergie a annoncé mettre sur la table au moins 275 millions de dollars pour faire avancer le projet roumain. NuScale a aussi passé un accord en octobre avec Standard Power, fournisseur d'infrastructures de traitement de données (data centers, bitcoins…), pour développer en Pennsylvanie et dans l'Ohio deux centrales à petits réacteurs modulaires qui produiront un total de près de 2 GW. La première centrale made by NuScale sera-t-elle opérationnelle au début de la prochaine décennie, comme espéré ? En 2009, la société tablait sur des réacteurs en service dès… 2017.

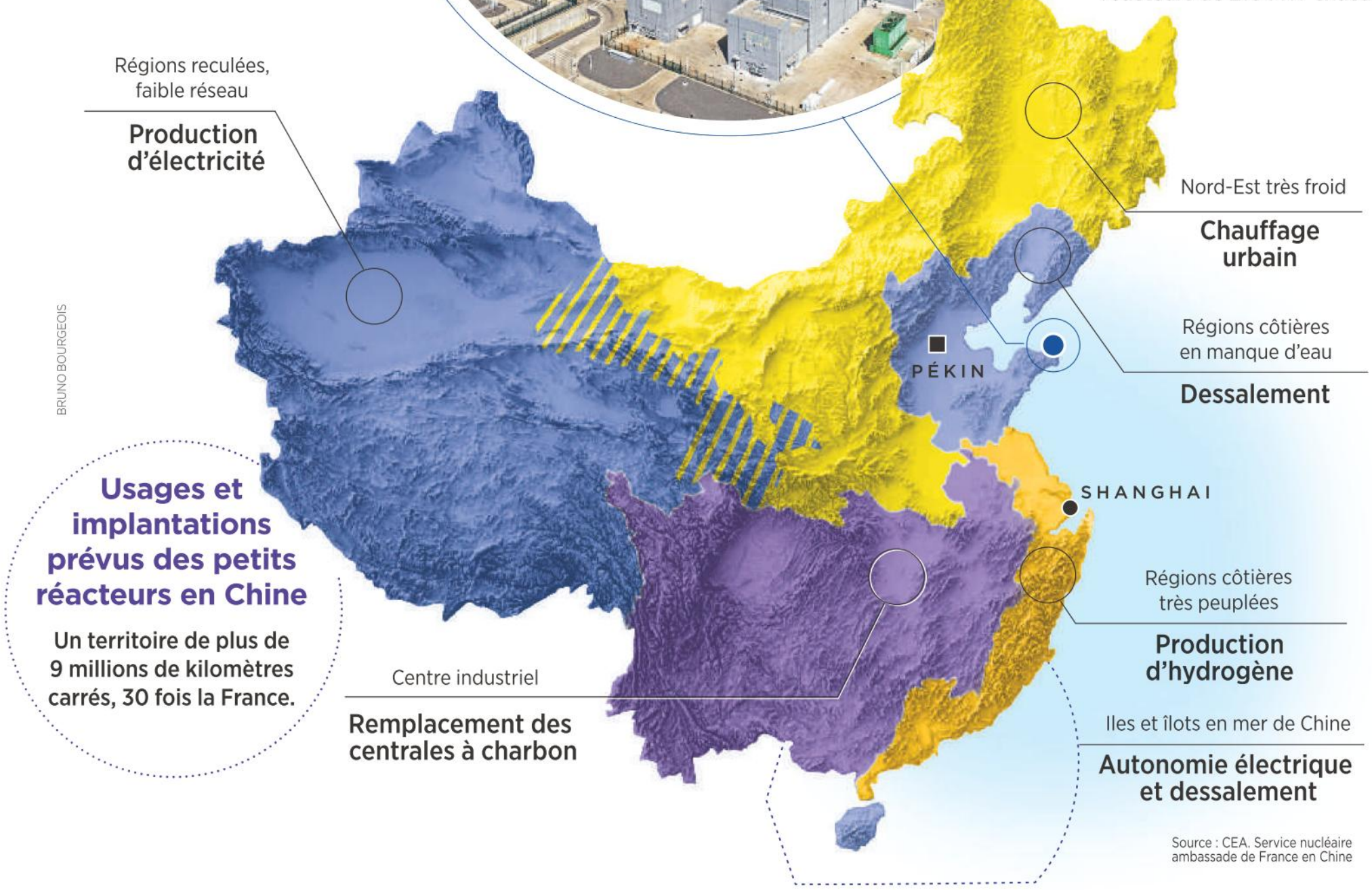
Act voté en 2022, pas moins de 10 milliards de dollars ont été accordés en subventions aux SMR de Westinghouse. Et depuis 2011, le département de l'Énergie a alloué près de 7 milliards pour booster la R&D dans les SMR, dont 2 milliards pour TerraPower et 1,2 milliard pour X-energy. Et 1,35 milliard sur dix ans pour NuScale, qui devait construire la première centrale de SMR des États-Unis. Mais en novembre dernier, patatras, son projet dans l'Idaho a été annulé : les municipalités clientes ont pris peur face à l'envolée des coûts.

Retour à la case départ ! *« Le grand défi est de trouver un client qui accepte de prendre en charge les premières centrales, d'assumer les risques liés aux coûts et au temps passé sur un projet pionnier* », souligne Marc Bianchi, analyste chez TD Cowen.

« De nombreux fournisseurs américains souhaitent participer à la construction de ces centrales, fournir des cuves, pompes, composants, indique Christopher Lohse, chez GAINnuclear, accélérateur d'innovation dépendant du département de l'Énergie. *Mais pour qu'un tel déploiement soit possible, il faut une chaîne d'approvisionnement solide.* » C'est-à-dire que de premiers SMR sortent enfin de terre. *« Nous nous rapprochons de ce point d'inflexion,* poursuit l'ingénieur. *Depuis un an, l'intérêt va grandissant. Mais il ne s'agit toujours pas d'une véritable demande.* » Tant qu'il n'y aura pas suffisamment de clients prêts à miser sur ces projets de SMR – aussi capitalistiques que risqués –, les rêves des *tech boys* d'un nucléaire abondant et à prix raisonnable resteront des rêves. ■

Philippe Boulet-Gercourt, à New York

La Chine a mis en service en décembre sa centrale de Shidao Bay alimentée par deux petits réacteurs de 210 MW chacun.



BRUNO BOURGEOIS

La Chine sur tous les fronts

Champion des grosses centrales qu'il construit à bon rythme, Pékin mise aussi sur les petits réacteurs modulaires qui peuvent s'adapter aux différents besoins de son territoire.

Première mondiale : le 6 décembre, après dix ans de travaux, la Chine a mis en service sa centrale nucléaire de Shidao Bay (province du Shandong), alimentée par deux petits réacteurs modulaires (SMR en anglais) à haute température refroidis au gaz *(lire p. 105)*, d'une puissance de 210 mégawatts (MW) chacun. Cette centrale pilote a pris cinq ans de retard mais, alors qu'ailleurs les mini-réacteurs en sont au stade du design, en Chine, ils vendent déjà leur électricité ! Un autre SMR plus classique, à eau pressurisée, est en construction sur l'île de Hainan, et doit être relié au réseau en 2026.

Premier émetteur de gaz à effet de serre au monde, avec ses polluantes centrales à charbon qui fournissent 58 % de sa production électrique, la Chine a résolu d'atteindre la neutralité carbone en 2060. On comprend donc pourquoi Pékin met les bouchées doubles, avec des investissements massifs dans les énergies renouvelables (16 % de son électricité provient de l'hydraulique, 9 % de l'éolien et 5 % du solaire) et dans le nucléaire (5 %). Alors que sa première centrale n'a été mise en service qu'en 1991, la Chine s'est hissée, depuis 2020, au deuxième rang mondial des producteurs d'électricité nucléaire, après les États-Unis mais devant la France, avec 55 réacteurs en fonctionnement et 26 en construction. L'engagement pris dans le 14e plan quinquennal (2021-2025) est de parvenir en 2025 à 70 gigawatts (GW)

ZHANG MANYI XINHUA/AFP

PUBLI
COMMUNIQUÉ

La filière nucléaire française, moteur de la réindustrialisation

Près de deux ans après l'annonce par le président de la République d'un nouveau programme nucléaire de grande ampleur et bénéficiant d'une évolution positive de l'opinion vis-à-vis du nucléaire , l'industrie nucléaire est pleinement mobilisée aux côtés des pouvoirs publics pour y contribuer et répondre ainsi aux enjeux climatiques, industriels et de souveraineté. Ce programme peut constituer un moteur pour la réindustrialisation de notre pays car la France est l'un des seuls pays à disposer d'une filière nucléaire complète, forte de plus de 500 entreprises cœur de métier nucléaire et plus de 3000 qui y contribuent, présente dans de nombreuses régions.

Les projets développés par les acteurs de la filière ont d'ores et déjà franchi des jalons importants (choix des sites pour les 6 réacteurs EPR2, accélération pour la définition du design de réacteurs innovants, dépôt du DAC pour le projet de stockage géologique CIGEO…).

Afin que la filière puisse répondre aux enjeux liés à ce nouveau programme, le Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire (GIFEN), syndicat professionnel de la filière qui regroupe plus de 500 membres (exploitants nucléaires, grandes entreprises, ETI, PME…), a lancé le programme MATCH qui vise à s'assurer de l'adéquation entre les besoins industriels et humains et les ressources disponibles.
Le rapport remis au printemps 2023 a permis d'estimer une augmentation d'activité de l'ordre de 25% au cours des dix prochaines années. Cette croissance se traduit par un besoin d'environ 100 000 nouveaux emplois équivalent temps plein, hors gains de productivité, dont la moitié pour continuer de renouveler les effectifs partants et l'autre moitié pour soutenir la croissance d'activité.
Le programme MATCH a aussi défini trois leviers d'actions sur lesquels la filière est mobilisée :

- **mobiliser** les ressources, via des actions d'attractivité, de développement des formations du bac professionnel ou bac +5, de l'amplification des dispositifs de compagnonnage dans les entreprises.

- **renforcer** la performance opérationnelle de la filière avec des axes de travail tels que la standardisation des pratiques industrielles, le déploiement des pratiques d'excellence opérationnelles ou le déploiement de solutions numériques, avec l'objectif de renforcer le « faire bon du premier coup ».

- **assurer** la robustesse économique et financière des entreprises et de la filière, par des actions sur les partenariats industriels dans la durée permettant les investissements nécessaires au niveau des entreprises de la filière.

MATCH s'inscrit dans une logique de mise à jour annuelle visant à permettre le pilotage de la dynamique de mise en adéquation des ressources avec les besoins de la filière.

La relance du nucléaire est l'un des programmes industriels majeurs de ce siècle pour la France. Il nécessitera des investissements dimensionnants au niveau des entreprises de la filière nucléaire, une organisation collective de nature à en assurer la performance opérationnelle mais également une ambition nationale permettant la tenue d'une cadence de production industrielle. A titre d'exemple, l'ambition de notre pays doit être de disposer d'une filière industrielle capable de construire 1 à 1,5 réacteur par an en France à l'issue de la première série de 6 EPR2, voir plus en cas de participation à des programmes à l'étranger, de développement des SMR à l'horizon considéré et de la possibilité de répondre à un éventuel besoin d'accélération des besoins domestiques. Une ambition qui permettra aux entreprises industrielles de dimensionner leur outil industriel et les investissements nécessaires.

À l'heure où la COP 28, qui s'est tenue fin 2023, a pour la première fois de son histoire mentionné dans sa déclaration finale la contribution de l'énergie nucléaire dans la lutte contre le changement climatique, la France dispose avec sa filière nucléaire d'un atout maître pour la décarbonation et la réindustrialisation de son économie.

[1]**Rapport BVA pour Orano, "L'évolution de la perception du nucléaire chez les Français", résultats publiés le 19 décembre 2023 : 57% des sondés sont favorables au nucléaire, contre 9% seulement de Français qui s'y disent radicalement opposés.**

de capacité installée, contre 57 GW aujourd'hui. En quatre ans, les Chinois ont validé le lancement de 25 réacteurs (4 en 2020, 5 en 2021, 10 en 2022, 6 en 2023), et les construisent en moyenne en 60 mois.

« La neutralité carbone est pour eux un levier en vue d'accentuer leur domination dans ces technologies d'avenir – les renouvelables et le nucléaire –, où leur montée en puissance est impressionnante », considère Tony d'Aletto, le conseiller nucléaire à l'ambassade de France à Pékin. Après avoir acheté des centrales à l'américain Westinghouse, aux français EDF et Areva et au russe Rosatom, les Chinois ont, au fil des transferts de technologie, acquis une autonomie suffisante pour concevoir et produire localement.

Par sa puissance et son innovation, la Chine s'impose

Désormais, ils sont lancés dans la course à l'innovation dans les plus petites gammes de puissance. *« La Chine est le pays idéal pour le déploiement des SMR,* explique Tony d'Aletto. *La modularité de ces petits réacteurs permet à ce pays immense de s'adapter à des utilisations différenciées selon les territoires »* *(lire carte p. 120)*. Là où les SMR seront sans doute les plus utiles, c'est dans les régions du Sichuan ou de Chongqing, le centre industriel de la Chine. Les industries lourdes qui s'y trouvent – acier, ciment – bénéficieront du remplacement des centrales à charbon. Or l'industrie compte pour 36 % des émissions de ce pays considéré comme l'usine du monde (contre 18 % pour la France).

Pékin met tout l'argent nécessaire et mobilise tous les acteurs situés dans le giron de l'État. Aux grands électriciens publics (CNNC, CGN) de déployer les technologies matures, aux grandes universités, comme Tsinghua, et à l'Académie des sciences (CAS) d'avancer dans la recherche, notamment sur les réacteurs à haute température, à neutrons rapides et à sels fondus. Ainsi, un prototype de 2 MW thermiques utilisant des sels fondus au thorium va démarrer à Wuwei, dans la province du Gansu, sous l'égide de la CAS. Avec ce plan de marche, combinant un développement cadencé des grosses centrales et des expérimentations multiples de mini-réacteurs, la Chine s'impose en géant de l'atome, en matière de puissance mais aussi d'innovation. *« Officiellement, le ministre en charge du nucléaire donne le chiffre de 10 % d'électricité venue de l'atome en 2060. Officieusement, j'entends entre 15 et 20 % »*, raconte Tony d'Aletto, qui remarque que *« les Chinois étaient partis avec vingt ans de retard, mais sur les SMR, c'est nous qui risquons d'être en retard… »* Et pour ces petits réacteurs, les Chinois ont de grandes ambitions à l'exportation. Avec cependant un sérieux bémol, soulevé par un constructeur de SMR européen : *« La gestion d'État du nucléaire en Chine est très opaque : ils vantent leurs succès mais taisent leurs échecs, voire les incidents, et ne partagent rien de leurs expérimentations. Sur le plan financier, on ne connaît pas exactement le montant des investissements, leurs coûts, à combien revient le KWh, et donc s'ils sont vraiment compétitifs. »* De quoi refroidir de potentiels clients… et faire planer une ombre sur les avancées chinoises. ■ **Philippe Pajot**

NIKOLAI GONTAR/GREENPEACE / HANDOUT/EPA/MAXPPP

En avril 2018, après 12 ans de chantier, la barge transportant la centrale nucléaire Akademik Lomonosov quitte Saint-Pétersbourg en direction de la Sibérie.

RUSSIE

Une centrale flottante fournit de l'énergie à une région isolée de Sibérie

La Russie est une pionnière en matière de mini-réacteurs, avec la première centrale nucléaire flottante au monde, Akademik Lomonosov, sur une barge de 144 mètres amarrée dans le port de Pevek (Sibérie orientale), équipée de deux réacteurs à eau pressurisée de 35 mégawatts. Elle est connectée au réseau électrique depuis décembre 2019 pour alimenter cette région minière isolée. Ce premier SMR mis en service hors propulsion nucléaire a produit environ 722 millions de kWh d'électricité, couvrant *« 55 % des besoins de ce réseau énergétique isolé »*, selon son directeur, Viktor Elagin. Mais la centrale n'a pas atteint sa pleine capacité en raison de défauts dans la tuyauterie des générateurs de vapeur, qui devraient être réparés d'ici 2025. Commencée en 2006, la construction de ce SMR pilote s'est révélée plus longue et quatre fois plus coûteuse que prévu. Cependant, selon Rosatom, l'opérateur nucléaire russe, cette première réalisation est suivie par une dizaine de clients potentiels en Amérique latine, Asie et Afrique, qui comportent des territoires insulaires et littoraux isolés. **S. R.**

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

CODE PRIVILÈGE : **CS448**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.** Idéal avec le Safran !

7€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences** *(1), (11).*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**. *(6), (8).*
*Allergène : **poisson**.*

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(7).*

6€ 30 gélules

Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile**. Idéal avec la Maca ! *(2), (4).*

6€ 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire**.

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.** *(1), (2), (9).*

6€ 45 gélules

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles**. *(2), (10).*

6€ 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

Le Grand Agenda 2024 OU **La Bouillotte "Hibou"**

1 cadeau au choix OFFERT

Agenda : *Dim. : L150 x H212 x Ep15 mm. Matière : PU, Polyester, Papier.* ***Bouillotte :*** *Coussin interne à réchauffer au micro-ondes. Dim. : L140 x H180 mm. Matière : Coton et perles de silice.*

Les Frais de Port Dès 15€ d'achat **OFFERTS** — **0€** *Au lieu de ~~6,50€~~*

dès **5€** **TOUS VOS PRODUITS**

EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	7,00€
L'Agenda OU La Bouillotte	OFFERT
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**29,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (11) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Recommandé pour la livraison.* **de ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PGRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** ☐ **l'Agenda** ou ☐ **la Bouillotte** et mon Catalogue				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
CODE PRIVILÈGE : **CS448**	**TOTAL À RÉGLER**			.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad — synadiet — La Poste 72h

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Et si un après-midi au bord de la piscine ressemblait à cela?

Et si vos vols étaient offerts?

©GETTY/KARSTEN BIDSTRUP

Croisières en Islande
avec vols offerts

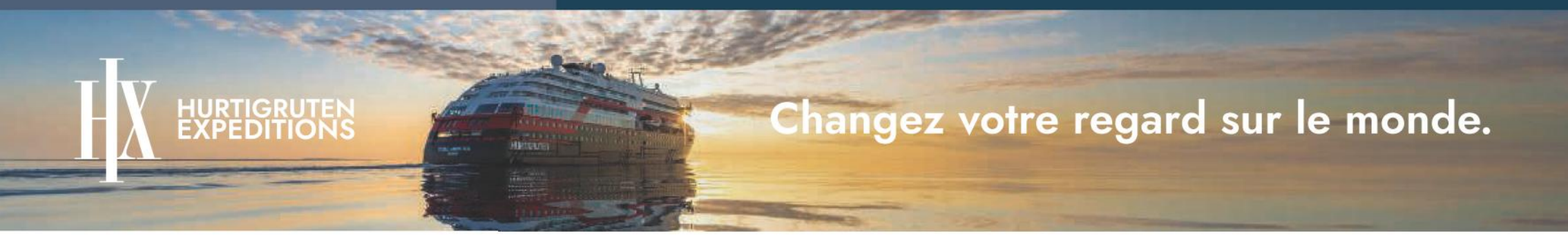
À PARTIR DE

4500€ TTC

Depuis 1896, nous sommes les pionniers de l'exploration. Réservez votre croisière d'expédition avant le 31 mars et nous vous offrons les vols internationaux sur une sélection de départs. Vivez une expérience unique à bord de navires confortables et parfaitement adaptés à nos destinations d'exception.

Tél: 01 86 26 04 19

hxexpeditions.com/fr ou dans votre agence de voyages



Offre soumise à conditions, non rétroactive, valable pour toute nouvelle réservation simultanée d'une croisière d'expédition et d'un forfait acheminement aérien du 28.12.23 au 31.03.24. La réduction « Vols offerts » s'applique sur le prix du forfait acheminement aérien vendu séparément de la croisière et uniquement sur les vols en classe économique au départ de Paris (en fonction des disponibilités). Ne s'applique pas sur les vols inclus dans l'itinéraire de la croisière. Cette offre est valable sur une sélection de départs et un nombre limité de cabines. Le prix de la croisière reste modulable et évolutif en fonction du remplissage du navire comme indiqué dans les conditions particulières de ventes. Non combinable avec les autres offres en cours (Réservation anticipée, tarif Groupes ou autre tarif spécifique) sauf la remise 1893 Ambassador. Hurtigruten France SAS au capital de 40 000 € - R.C.S Paris B 449 035 005 - IM 075100037 - APST RCAPST HISCOX/125 520.

En savoir plus